

Unterlage 05.04.02 – Grundwassermodellierung

Bericht 05.04.02.01 - Teil 2 - Erstellung und Anpassung des Grundwassermodells

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Vorgehensweise.....	1
3	Das Grundwassermodell aus dem ROV	1
4	Erstellung des FEFLOW-Grundwassermodells	2
4.1	Finite-Elemente-Netz	2
4.2	Randbedingungen	2
5	Stationäre Modellkalibrierung.....	2
5.1	Modellparameter und Randbedingungen	3
5.2	Anpassungen des FE-Modells.....	3
5.3	Ergebnisse	3
5.4	Diskussion	6
6	Instationäre Modellkalibrierung	6
6.1	Verwendete Messdaten	6
6.2	Modellparameter und Randbedingungen	6
6.3	Anpassung des FEFLOW-Modells	10
6.4	Ergebnisse	11
6.4.1	Grundwasserstände.....	11
6.4.2	Wasserbilanzen	14
6.5	Diskussion	15
7	Planzustand Alternative 3.....	16
7.1	Modellparameter und Randbedingungen	16
7.2	Anpassungen des FEFLOW-Modells	19
7.3	Modellergebnisse.....	20
7.3.1	Ist-Zustand.....	20
7.3.2	Planzustand Alternative 3.....	20
8	Sensitivitätsanalyse.....	21
8.1.1	Sensitivität k_f -Werte	21
8.1.2	Sensitivität Sohdurchlässigkeiten	22
8.1.3	Sensitivität Grundwasserneubildung	22
9	Unsicherheitsanalyse	22
10	Zusammenfassende Bewertung	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Stationäre und instationäre Leakage-Randbedingungen für Gewässer und Gräben ...	7
Abbildung 2:	Maßgebende Abflussganglinie der Donau am Pegel Pfelling (Donau-km 2305,5)	8
Abbildung 3:	Verwendete Abflussganglinie der Kößnach am Pegel Koes3	8
Abbildung 4:	Wasserstände der Donau am Pegel Straubing (Donau-km 2327,0) und Simulationszeitraum mit diskreten Zeitschritten für instationäre Modellkalibrierung (Frühjahrsflutung 2015)	9
Abbildung 5:	Diskretisierte zeitabhängige Wasserspiegellagen in der Oberauer Schleife für instationäre Modellkalibrierung	10
Abbildung 6:	Gemessene und berechnete Grundwasserstände an der Messstelle L 83/1 sowie mittlere Tagessummen der gemessenen Niederschläge an den Stationen Aholting, Straubing, Bogen-Pfelling und Steinach	14
Abbildung 7:	Einfluss der verzögerten Vorlandbenetzung auf die Grundwasserganglinie für Messstelle R125/1	15
Abbildung 8:	Einfluss der verzögerten Vorlandbenetzung auf die Grundwasserganglinie für Messstelle R124	16
Abbildung 9:	Abflussganglinie für HQ30 der Donau am nördlichen Modellrand mit Zeitschritten für das Grundwassermodell	17
Abbildung 10:	Abflussganglinie für HQ3 der Kößnach am nördlichen Modellrand	18
Abbildung 11:	Flutungsverlauf in den einzelnen Poldergebieten	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bilanzbereiche für gesamten Modellraum für stationäre Modellkalibrierung	4
Tabelle 2:	Bilanzierung Austausch Oberflächengewässer mit dem Grundwasser für stationäre Modellkalibrierung	5
Tabelle 3:	Bilanzierung Austausch Drainagegräben mit dem Grundwasserleiter für stationäre Modellkalibrierung	5

Anlagen

- A-1 Übersicht Gräben und Gewässer
- A-2 Räumliche Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte)
- A-3 Räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung
- A-4 Teildurchlässigkeit der Schmalwand im Rückstaudamm
- A-5 Stationäre Kalibrierung: Gemessene und berechnete Grundwassergleichen
- A-6 Stationäre Kalibrierung: tabellarische Gegenüberstellung gemessener und berechneter Grundwasserstände
- A-7 Stationäre Kalibrierung: grafische Gegenüberstellung gemessener und berechneter Grundwasserstände
- A-8 Betriebsanweisung Frühjahrsflutung 2015
- A-9 Übersicht Grundwassermessstellen für instationäre Kalibrierung (Frühjahrsflutung 2015)
- A-10 Übersicht Oberflächenwasserpegel für instationäre Kalibrierung (Frühjahrsflutung 2015)
- A-11 Sohl- und Wasserspiegellagen Breitenfelder Graben
- A-12 Wasserstandsganglinie Oberauer Schleife - oberer Teil und Verzögerung auf überflutetem Vorland
- A-13 Instationäre Kalibrierung anhand der Frühjahrsflutung 2015: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Grundwasserganglinien
- A-14 Instationäre Kalibrierung anhand der Frühjahrsflutung 2015: Bilanzen Austausch Oberflächengewässer-Grundwasser
- A-14a Instationäre Kalibrierung anhand der Frühjahrsflutung 2015: Vergleich berechneter In-/Exfiltrationsraten und gemessener Abflüsse in Entwässerungsgräben für Frühjahrsflutung 2015
- A-15 Ist-Zustand: berechnete maximale Grundwasserstände
- A-16 Planzustand Alternative 3: Übersicht der Poldergebiete
- A-17 Planzustand Alternative 3: berechnete maximale Grundwasserstände
- A-18 Planzustand Alternative 3: berechnete Grundwasserspiegeldifferenzen gegenüber Ist-Zustand
- A-19 Planzustand Alternative 3: maximale Austauschmengen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser
- A-20 Planzustand Alternative 3: Sensitivitätsanalyse k_f -Werte
- A-21 Planzustand Alternative 3: Sensitivitätsanalyse Sohldurchlässigkeiten
- A-22 Planzustand Alternative 3: Sensitivitätsanalyse Grundwasserneubildung

Verwendete Unterlagen

- [1] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell Teil 1: Hydrogeologisches Modell, Björnßen Beratende Ingenieure, Niederlassung Augsburg, Februar 2011 (Unterlage 05-04-01)
- [2] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell Teil 2: Aufbau Grundwassermodell, stationäre und instationäre Anpassung, Björnßen Beratende Ingenieure, Niederlassung Augsburg, Oktober 2011
- [3] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell Teil 3: Einsatz des Grundwassermodells, Auswirkungen auf die Grundwasserstände, Björnßen Beratende Ingenieure, Niederlassung Augsburg, März 2012
- [4] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell Teil 4: Beweissicherungsprogramm, Björnßen Beratende Ingenieure, Niederlassung Augsburg, Januar 2013
- [5] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell - Sondermessnetz Oberauer Schleife- Auswertung und Bewertung ergänzender Erkundungen, Björnßen Beratende Ingenieure, Niederlassung Augsburg, Oktober 2014
- [6] Messdaten Messkampagne 2015 „Sondermessnetz Oberauer Schleife“, WWA Deggendorf
- [7] Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife, Grundwassermodell - Neukalibrierung MODFLOW-Modell, Lahmeyer Hydroprojekt GmbH, Geschäftsbereich Bad Vilbel, Januar 2017
- [8] Entscheidungsvorlage zur Fortführung der Planung „Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife“, Ingenieurgemeinschaft Lahmeyer Hydroprojekt - Lahmeyer München - Büro Prof. Kagerer, September 2016

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Um die Auswirkungen der geplanten Hochwasserrückhaltung (HWR) Oberauer Schleife auf die Grundwasserverhältnisse zu untersuchen, wurde im Rahmen des Raumordnungsverfahrens (ROV) ein Finite-Differenzen-Grundwassermodell (FD-Grundwassermodell) basierend auf dem MODFLOW-Modellsystem aufgestellt und kalibriert [2]. Dieses vorhandene Grundwassermodell wurde von der Ingenieurgemeinschaft für die weitere Planung der HWR-Maßnahme übernommen.

Im Zuge einer umfassenden Messkampagne zur Frühjahrsflutung des Jahres 2015 wurde das FD-Grundwassermodell [7] neukalibriert. Des Weiteren wurden mit dem Modell vorläufige Simulationen für neue Planungsvarianten durchgeführt, um erste Erkenntnisse über die Auswirkungen der einzelnen Varianten auf die Grundwasserverhältnisse zu gewinnen.

Da krummlinige Verläufe von modellrelevanten Strukturen wie Gewässer und Deiche vom orthogonalen MODFLOW-Modellgitter nur näherungsweise erfasst werden können, soll auf Grundlage des vorhandenen Modells ein Finite-Elemente-Modell (FE-Grundwassermodell) erstellt werden. Die flexiblere räumliche Diskretisierung eines FE-Modells ermöglicht es, derartige Strukturen präzise im Modell abzubilden. Im vorliegenden Bericht wird die Überführung des FD-Grundwassermodells in ein FE-Grundwassermodell auf Basis des Programmsystems FEFLOW beschrieben.

Auf Grundlage der Entscheidungsvorlage [8] wurde im März 2017 seitens des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz beschlossen, dass die HWR Oberauer Schleife auf Basis der Planungsvariante Alternative 3 fortgesetzt werden soll. Im vorliegenden Bericht werden die mit dem neu erstellten FE-Grundwassermodell erzielten Simulationsergebnisse für diesen Planzustand vorgestellt.

2 Vorgehensweise

Auf der Grundlage des vorhandenen FD-Grundwassermodells und unter Berücksichtigung aller modellrelevanten Gebietsstrukturen wurde zunächst das Finite-Elemente-Netz des neuen FE-Grundwassermodells erstellt. Anschließend wurden die Modellparameter und -randbedingungen aus dem FD-Grundwassermodell in das FE-Grundwassermodell übertragen. Es folgte eine Anpassung der Modellparameter anhand einer stationären Grundwassersimulation für mittlere Grundwasserverhältnisse basierend auf Mittelwerten des Zeitraums 1996 bis 2005 sowie anhand einer instationären Grundwassersimulation für die ökologischen Frühjahrsflutung 2015.

In einem weiteren Schritt wurde mit dem neu erstellten FE-Grundwassermodell der Planzustand Alternative 3 gerechnet sowie einer Sensitivitätsanalyse der Hauptparameter durchgeführt.

Der vorliegende Bericht stellt die Fortsetzung und Weiterentwicklung der Grundwassermodellierung für das Hochwasserrückhalteprojekt Oberauer Schleife dar. Die grundlegende Erstellung des FD-Grundwassermodells sowie dessen Kalibrierung sind in den Berichten [1] bzw. Unterlage 05-04-01 - Teil 1 Hydrogeologisches Modell, [2] und [7] dokumentiert.

3 Grundwassermodell aus dem ROV

Im Rahmen des Raumordnungsverfahrens wurde eine Grundwassermodell zur Untersuchung der Auswirkungen der geplanten Hochwasserrückhaltung (HWR) Oberauer Schleife auf das Grundwasser erstellt und eingesetzt. Nach erstem Einsatz des Grundwassermodells wurde auf Grundlage des Beweissicherungsprogramms vom Wasserwirtschaftsamt (WWA) Deggendorf im Jahr 2014 das Sondermessnetz Oberauer Schleife eingerichtet, um festgestellte Datendefizite zu beheben. Das Sondermessnetz umfasste neue Pumpversuche, die Sanierung und Errichtung neuer Grundwassermessstellen sowie neue Oberflächenwasserpegel und manuelle Wasserstandsmessungen. Diese Maßnahmen dienen der

Verifizierung der im Rahmen der Modellkalibrierung ermittelten Untergrunddurchlässigkeiten sowie der genaueren Erfassung der Wechselwirkung von Grundwasser und binnenseitigem Entwässerungssystem in den Poldern Kößnach, Öberau, Sossau und Hornstorf.

Das FD-Grundwassermodell aus dem ROV wurde für die weitere Planung der HWR-Maßnahme übernommen. Auf Basis der neuen Messdaten wurde zuerst eine stationäre Anpassung der Modellparameter vorgenommen, bei der in erster Linie die aus den neuen Pumpversuchen gewonnenen Untergrunddurchlässigkeiten (k -Werte) sowie Randzuflüsse und Grundwasserneubildung angepasst wurden. Auf die stationäre Kalibrierung aufbauend wurde eine instationäre Anpassung des Modells für die ökologische Frühjahrsflutung des Jahres 2015 durchgeführt. Bei der instationären Kalibrierung wurden in erster Linie Leakagekoeffizienten und Sohllagen der Oberflächengewässer sowie der Speicherkoeffizient angepasst. Ergänzend zu der instationären Modellkalibrierung wurden abschließend zwei Modellvalidierungen anhand der Messdaten für die ökologische Frühjahrsflutung 1998 bzw. 2016 vorgenommen.

Das erweiterte und aktualisierte FD-Grundwassermodell [7] bildet die Grundlage für die Umstellung auf das FE-Grundwassermodell, welches für die weitere Planung eingesetzt werden soll. Alle Daten und Informationen des bestehenden und aktualisierten FD-Grundwassermodells finden bei der Modellumstellung und dem Aufbau des neuen FE-Grundwassermodells Verwendung.

4 Erstellung des FEFLOW-Grundwassermodells

Das Finite-Elemente-Grundwassermodell wurde mittels des von DHI-WASY GmbH entwickelten Programmsystems FEFLOW 7.0 erstellt.

4.1 Finite-Elemente-Netz

Das etwa 35,3 km² große Modellgebiet entspricht dem des MODFLOW-Modells. Das Finite-Elemente-Netz umfasst 49.274 Knoten und 97.588 dreieckige Elemente. Die durchschnittliche Elementgröße beträgt 362 m², wobei diese je nach vorgegebenen abzubildenden Geometrien räumlich variiert, sodass komplexere Strukturen feiner aufgelöst werden können.

4.2 Randbedingungen

Durch unterschiedliche Ansätze bei den Randbedingungen sowie durch die unterschiedliche räumliche Diskretisierung ergeben sich bei der Wirkung von Randbedingungen Differenzen zwischen den beiden Modellen. Im Unterschied zu den flächig definierten Leakage-Randbedingungen für größere Gewässer (Oberauer Schleife, Donau, Kößnach) sind die Entwässerungsgräben in FEFLOW linienförmig entlang der Gewässerachse definiert. Damit die mit dem FEFLOW-Modell erzielten Ergebnisse mit denen des MODFLOW-Modells vergleichbar sind, müssen Sohldurchlässigkeiten der linienförmigen Leakage-Randbedingungen an den Gräben angepasst werden. Die sich so ergebenden absoluten Werte für die Sohldurchlässigkeiten von Gräben in FEFLOW („transfer rates“) entsprechen daher nicht den Werten der „Leakagekoeffizienten“ in MODFLOW.

Die Teildurchlässigkeit der Schmalwand im Rückstaudamm musste aufgrund ihres kurvigen Verlaufs und des daraus resultierenden Längenunterschiedes im Vergleich zu MODFLOW ebenso angepasst werden.

5 Stationäre Modellkalibrierung

Das MODFLOW-Grundwassermodell wurde anhand der mittleren Verhältnisse für den Zeitraum WWJ 1996/2005 stationär kalibriert. Dieser stationäre Zustand wurde auch mit dem FEFLOW-Modell gerechnet. Die für die stationäre Kalibrierung verwendeten Grundwassermessstellen sind in Anlage A-5 abgebildet.

5.1 Modellparameter und Randbedingungen

Der stationären Simulation liegen folgende Randbedingungen und Parameter zugrunde:

- Kein Zufluss über die Basis des Grundwasserleiters (Quartärbasis)
- No-Flow-Randbedingung für westliche und östliche Modellgrenze
- Dirichlet-Randbedingung für die nördliche Modellgrenze (319,5 mNN)
- Zufluss über südlichen Modellrand: Leakage-Randbedingung für das Oberwasser der Staustufe Straubing, maßgeblich gesteuert über Systemdurchlässigkeit der Schmalwand im Rückstaudamm. Die Verteilung der Schmalwand-Durchlässigkeit in MODFLOW ist in Anlage A-4 dargestellt.
- Baggerseen als See-Randbedingung mit $k_f = 1$ m/s.
- Speicherkoeffizient für freie Grundwasserverhältnisse: 15%
Speicherkoeffizient für gespannte Grundwasserverhältnisse: 0,5%
- Die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung wurde aus dem hydrogeologischen Modell [1] bzw. Unterlage 05-04-01 - Teil 1 Hydrogeologisches Modell übernommen. Die Verteilung ist in Anlage A-3 dargestellt.
- Die räumliche Verteilung der k_f -Werte ist Anlage A-2 zu entnehmen.
- Leakage-Randbedingungen für Gewässer und Gräben: Sohllagen und mittlere Wasserspiegellagen wurden entsprechend des Modellaufbaus und der ersten stationären Modellanpassung [2] angesetzt. Für einige Entwässerungsgräben wurden die im Rahmen der instationären Neukalibrierung korrigierten Sohllagen übernommen (vgl. [7] Anlagen A-14 und A-15). Die neukalibrierten MODFLOW-Leakagekoeffizient, die der Umrechnung in FEFLOW-Gewässer-Randbedingungen zugrunde liegen, sind in Bericht [7] Anlage A-16 einzusehen. Anlage A-1 zeigt eine Übersicht der Gräben und Gewässer im Modellgebiet.

5.2 Anpassungen des FE-Modells

Der Festpotenzialrand, die Teildurchlässigkeit der Schmalwand im Rückstaudamm sowie einige Gewässer mussten aufgrund der in Abschnitt 4.2 erwähnten Unterschiede der beiden Modelle angepasst werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der instationären Simulation einige Anpassungen am FEFLOW-Modell vorgenommen, die in die stationäre Simulation übernommen wurden (vgl. Abschnitt 6.3).

5.3 Ergebnisse

Grundwasserstände

Die berechneten Grundwassergleichen für mittlere Verhältnisse sind in Anlage A-5 dargestellt. Die Anlagen A-6 und A-7 zeigen die tabellarische bzw. grafische Gegenüberstellung der Mittelwerte der an den Grundwassermessstellen gemessenen Grundwasserstände mit den vom Modell berechneten.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Natur, mit Abweichungen kleiner als 0,2 m und einer Standardabweichung von 0,15 m. Am nord-westlichen Modellrand in der Nähe des Schmalwandfensters (L 71, L 74, L 75, L 75/1), am östlichen Modellrand (L 102/1) sowie auf der Niederterrasse (7141-WWA 5) kommt es vereinzelt zu Abweichungen zwischen 0,2 und 0,4 m. Die Differenzen sind womöglich auf die gewählten Randbedingungen an den Modellrändern zurückzuführen. Lediglich an der Messstelle 7138-WWA 2 auf der Niederterrasse kommt es zu einer Abweichung von 0,59 m, was womöglich auf Einflüsse der in diesem Gebiet liegenden Baggerseen zurückzuführen ist. Damit liegen alle Messstellen, die etwas höhere Abweichungen aufweisen, in der Nähe der Modellränder und nicht in den primär relevanten Bereichen.

Wasserbilanzen

Tabelle 1 zeigt die Grundwasserbilanz für den gesamten Modellraum. Aus der Bilanz ist ersichtlich, dass bei mittleren Verhältnissen die Grundwasserneubildung den größten Zufluss in das Grundwasser bildet.

Tabelle 1: Bilanzbereiche für gesamten Modellraum für stationäre Modellkalibrierung

Bilanzbereich	Zufluss (l/s)	Abfluss (l/s)	Summe (l/s)
Grundwasserneubildung bzw. Verdunstung über Seefläche	123	-3	120
Randzustrom quartär über nördlichen. Modellrand	26	-	26
Aussickerung in Drainagegräben	-	-	-
Austausch Gewässer/Grundwasser	91	-237	-146
Summe	240	-240	0

Der Austausch zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser beruht entweder auf Infiltration von Oberflächenwasser oder auf Exfiltration aus dem Grundwasser. Die Interaktion der einzelnen Gewässer und Gräben mit dem Grundwasser ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeschlüsselt.

Kleine Differenzen im Vergleich zum MODFLOW-Modell sind einerseits auf die Anpassung der Kößnach (vgl. Abschnitt 6.3) und andererseits auf die unterschiedlichen Ansätze zurückzuführen, an der nun bei mittleren Verhältnissen etwas mehr Wasser exfiltriert (vgl. [7] Abschnitt 4.3).

Tabelle 2: Bilanzierung Austausch Oberflächengewässer mit dem Grundwasser für stationäre Modellkalibrierung

Gewässer /-abschnitt	Netto - Infiltration (+) bzw. Netto - Exfiltration (-) in l/s
Donau - Oberwasser Staustufe	35
Donau - Unterwasser Staustufe	-46
Öberauer Schleife - oberer Teil	18
Öberauer Schleife - unterer Teil	-11
Kößnach (-ableiter)	-38
Überleitung Perlbachgraben	-15
Perlbachgraben	-32
Pichseegraben	-10
Pittricher Rinne	-10
Hauptkanal	-8
Hartbauergraben	-3
Kalter Graben	-12
Hornstorfer Graben	-9
Fischerdorfer Graben	-4
Summe	-144

Tabelle 3: Bilanzierung Austausch Drainagegräben mit dem Grundwasserleiter für stationäre Modellkalibrierung

Graben	Netto - Infiltration (+) bzw. Netto - Exfiltration (-) in l/s
Neudaugraben	-0.5
Grabensystem Polder Öberau (Breitenfelder Graben)	-0.8
Gräben südlich Schöpfwerk Kößnach	-0.2
Grabenzulauf zur Pittricher Rinne	0.0
Grabenzulauf zum Hartbauergraben	-0.4
Oberer Nachtweidegraben	-0.2
Summe	-2.1

5.4 Diskussion

Für die Simulation der mittleren Verhältnisse ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserhöhen. Durch die in FEFLOW vorgenommenen Anpassungsmaßnahmen, konnten die guten Ergebnisse des MODFLOW-Modells reproduziert werden.

6 Instationäre Modellkalibrierung

Die instationäre Kalibrierung des MODFLOW-Grundwassermodells erfolgte seinerzeit auf Grundlage der ökologischen Frühjahrsflutung 2015 (vgl. [7]). Für die instationäre Kalibrierung des neuen FEFLOW-Modells wurde derselbe Kalibrierungszeitraum sowie die gleiche zeitliche Diskretisierung gewählt. Der zeitliche Ablauf der Frühjahrsflutung 2015 ist in der Betriebsanweisung (s. Anlage A-8) beschrieben.

6.1 Verwendete Messdaten

Für die instationäre Kalibrierung wurden die gemessenen Grundwasserganglinien von insgesamt 34 Grundwassermessstellen verwendet. Anlage A-9 zeigt die Lage der Grundwassermessstellen im Modellgebiet.

6.2 Modellparameter und Randbedingungen

Der instationären Simulation liegen folgende Annahmen und Randbedingungen zugrunde:

- Als Ausgangsgrundwasserstände für die Modellrechnung werden mittlere Grundwasserverhältnisse zugrunde gelegt.
- Die Grundwasserneubildung wird über den gesamten Simulationszeitraum konstant gehalten. Die räumliche Differenzierung der Grundwasserneubildungsrate wurde entsprechend der Verteilung in Anlage A-3 angesetzt.
- Für den Speicherkoeffizient wurden die folgenden Werte verwendet:
Freie Grundwasserverhältnisse: 15%
Gespannte Grundwasserverhältnisse: 0,1%
- Die Sohldurchlässigkeiten wurden der stationären Kalibrierung (vgl. Abschnitt 5.1) entnommen.

Neben einigen aus der stationären Kalibrierung übernommenen stationären Leakage-Randbedingungen, liegen der instationären Simulation die in Abbildung 1 dargestellten und im Folgenden kurz erläuterten zeitabhängigen Leakage-Randbedingungen zugrunde.

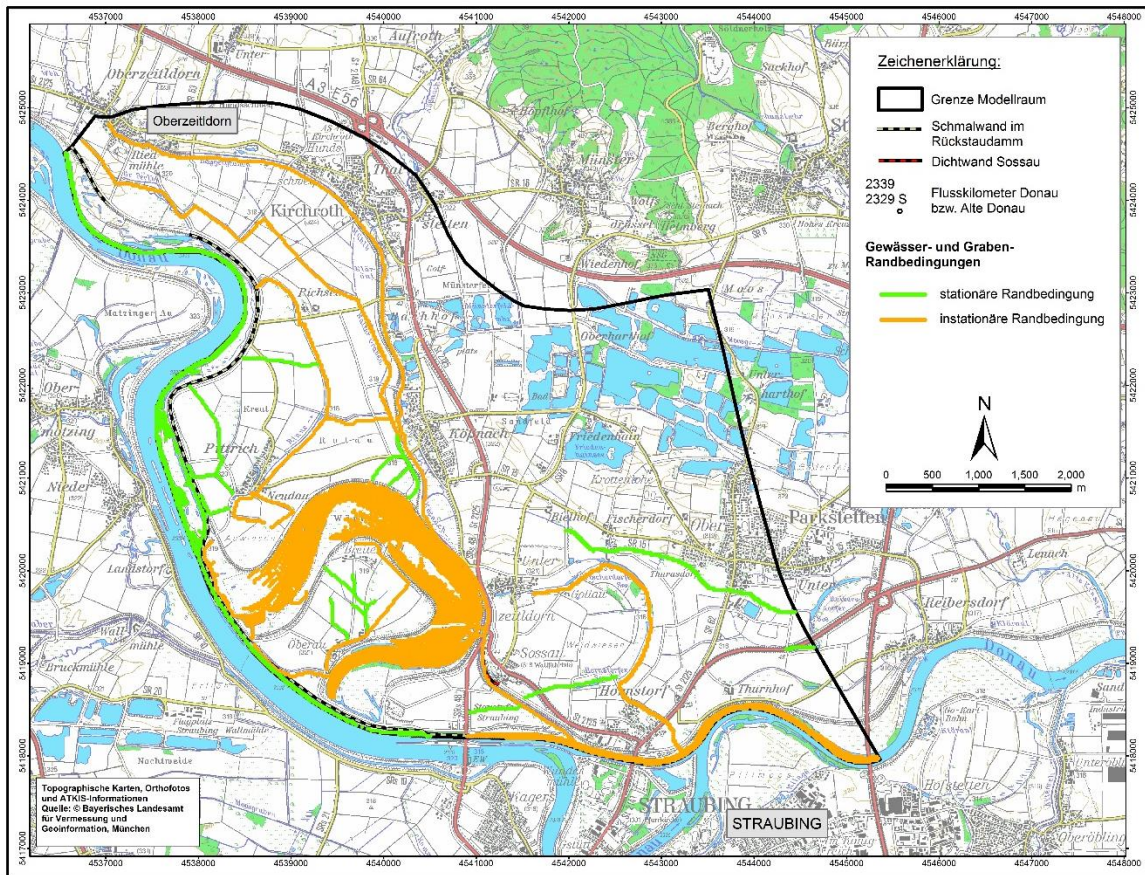


Abbildung 1: Stationäre und instationäre Leakage-Randbedingungen für Gewässer und Gräben

Donau und Kößnach (-ableiter)

Mit Hilfe eines eindimensionalen Strömungsmodells wurden zeitabhängige Wasserspiegellagen für die Leakage-Randbedingung der Donau im Unterstrom der Staustufe Straubing sowie der Kößnach bzw. des Kößnach-Ableiters berechnet. Die maßgebende Abflussganglinie ist in Abbildung 2 zu sehen. Der Berechnung der Wasserspiegellagen der Kößnach liegt die am Pegel Koes3 gemessene Abflussganglinie zugrunde, die am Ende des Simulationszeitraumes mangels Messdaten ergänzt wurde (siehe Abbildung 3).

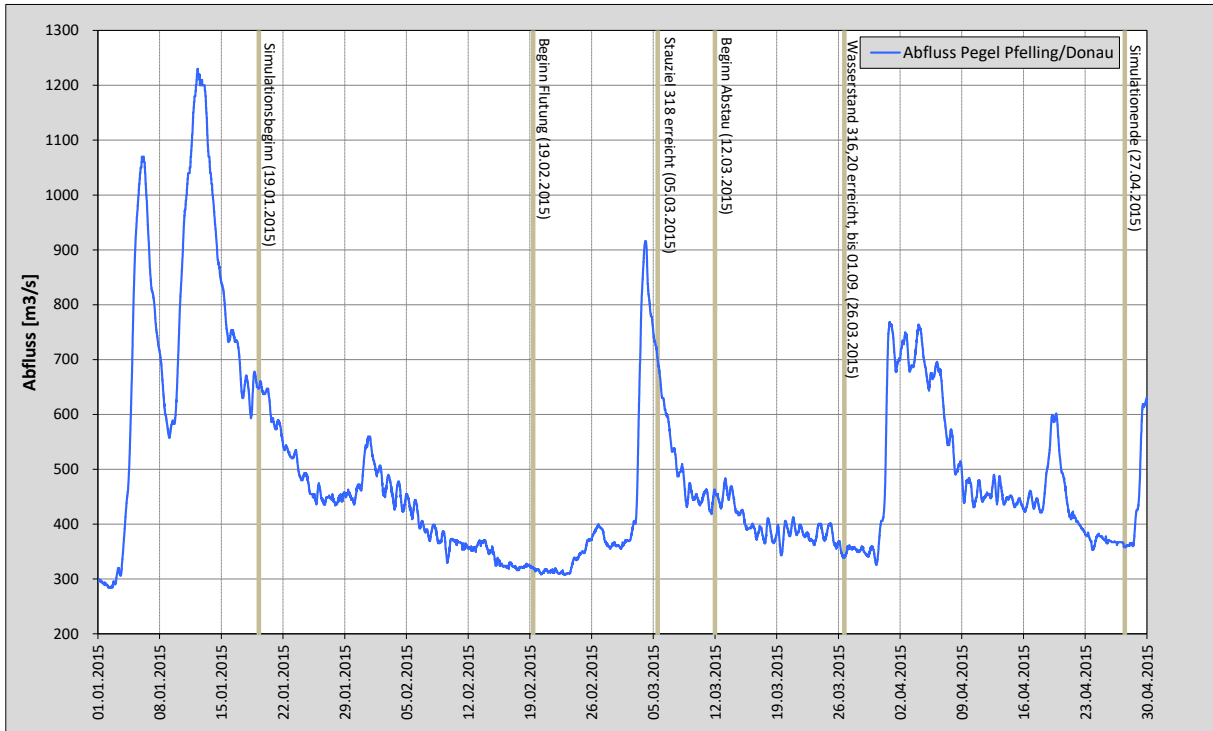


Abbildung 2: Maßgebende Abflussganglinie der Donau am Pegel Pfelling (Donau-km 2305,5)

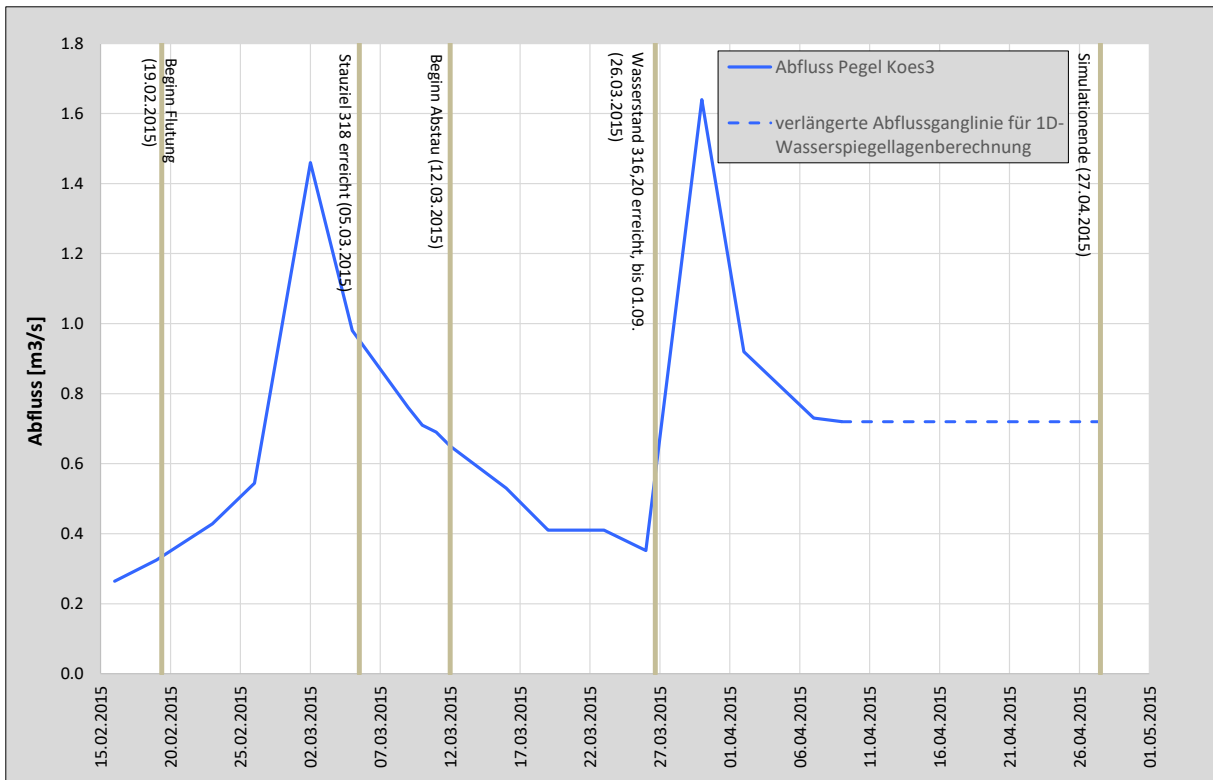


Abbildung 3: Verwendete Abflussganglinie der Kößnach am Pegel Koes3

Abbildung 4 zeigt die am Pegel Straubing gemessenen Donauwasserstände und die darauf beruhende zeitliche Diskretisierung für die instationäre Grundwassersimulation. Der gewählte Zeitraum für die Grundwassersimulation erstreckt sich vom 19.01.2015 bis 27.04.2015 und umfasst etwa 3,3 Monate. Die Zeitschritte variieren zwischen 10 Stunden und 9 Tagen.

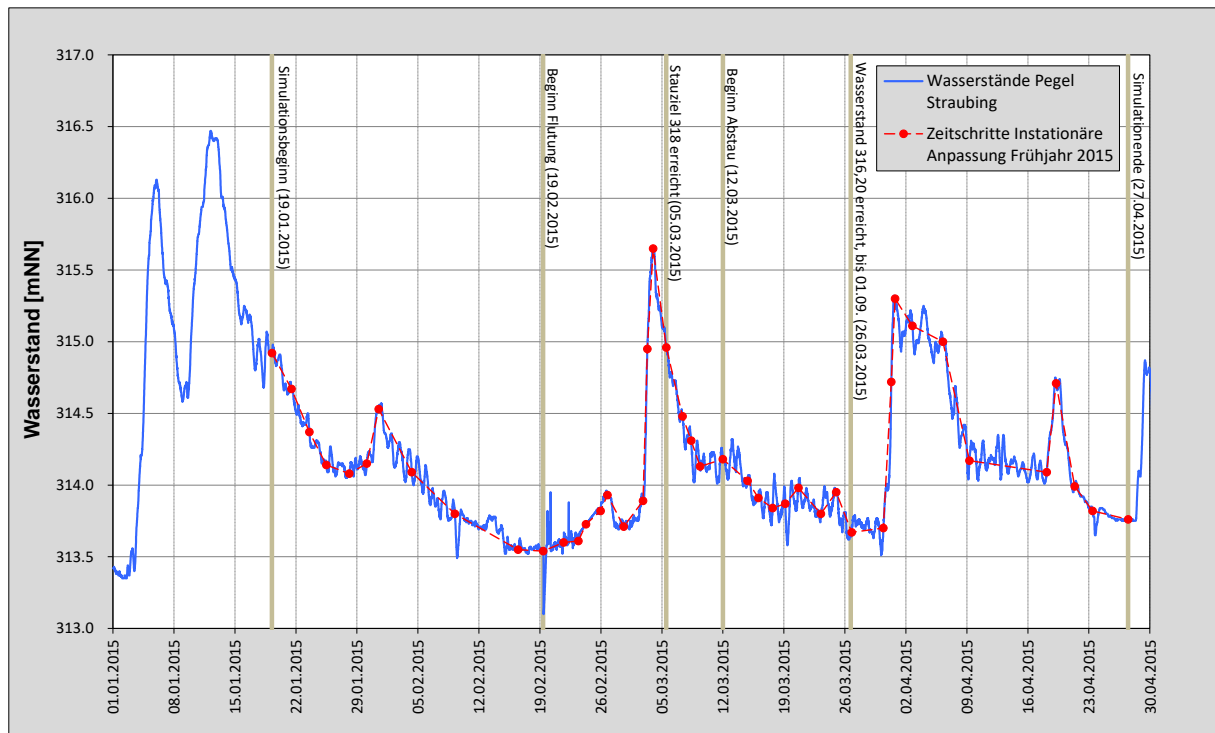


Abbildung 4: Wasserstände der Donau am Pegel Straubing (Donau-km 2327,0) und Simulationszeitraum mit diskreten Zeitschritten für instationäre Modellkalibrierung (Frühjahrsflutung 2015)

Für die Donau im Oberstrom der Staustufe Straubing wird analog zum MODFLOW-Modell ein konstanter Wasserspiegel von 320 mNN (Stauziel) angesetzt. Geringe Variationen des Donauwasserspiegels im Oberwasser der Staustufe können aufgrund der Untergrundabdichtung im Stauhaltungsstamm vernachlässigt werden.

Oberauer Schleife

Das System Oberauer Schleife besteht aus dem Absetzbecken, dem oberen Schleifenenteil mit Vorland sowie dem unteren Schleifenenteil mit Vorland. Das aus der Donau ausgeleitete Wasser wird über das Entnahmebauwerk in das Absetzbecken eingeleitet. Vom Absetzbecken fließt das Wasser über ein Verbindungsstück in den oberen Teil der Oberauer Schleife. Im unteren Teil der Oberauer Schleife kommt es infolge der Flutung des oberen Teils zu erheblichen Aussickerungen und somit zu einem Anstieg des Wasserspiegels. Aus den Messdaten der Pegel PR 5, Oeber1 und Oeber 2 (vgl. Anlage A-10) wurden die in Abbildung 5 dargestellten zeitabhängigen Wasserspiegellagen für die drei Einheiten abgeleitet. Dabei wurde angenommen, dass sich jede Einheit auf der gesamten Fläche gleichmäßig füllt bzw. entleert.

Die sich aus der Verschneidung des digitalen Höhenmodells mit der maximalen Einstauhöhe (318,00 mNN) ergebende maximale Einstaufläche bzw. Überflutungsfläche des oberen Schleifenenteils wurde aus dem von Björnsen Beratende Ingenieure aufgestellten Grundwassermodell [2] übernommen und auf das FEFLOW-Modell übertragen.

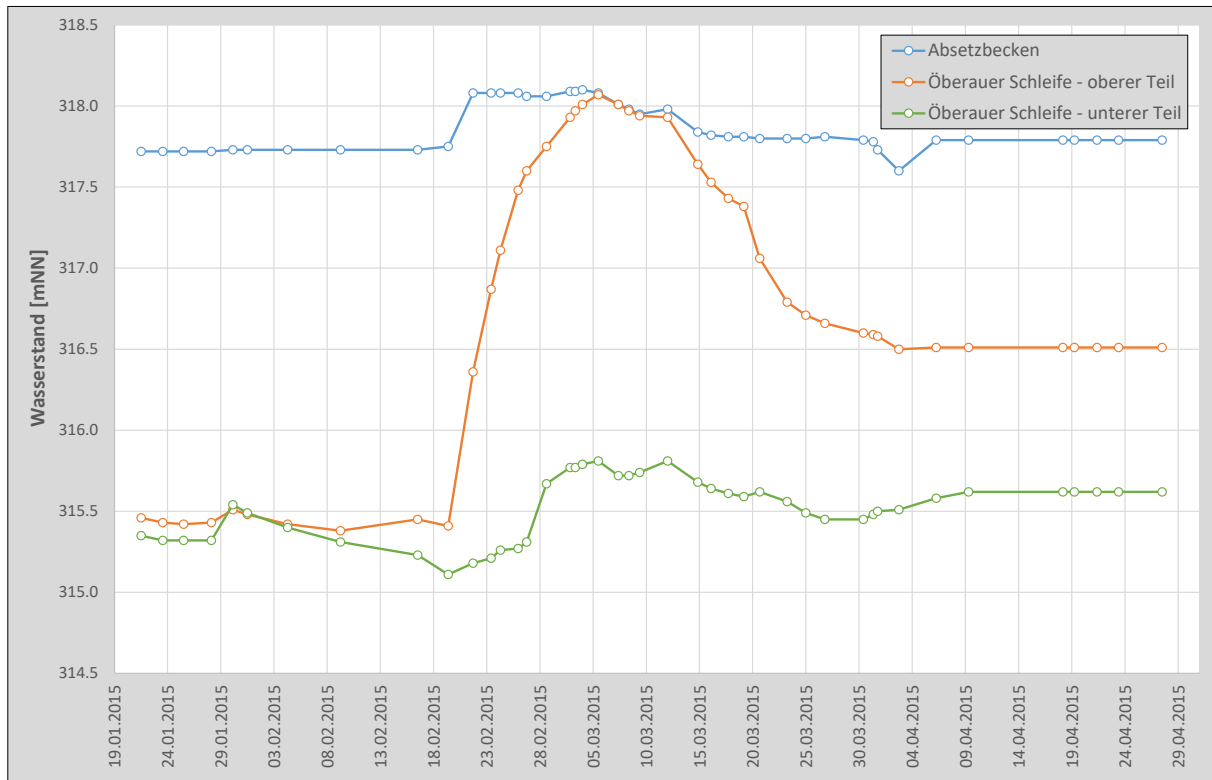


Abbildung 5: Diskretisierte zeitabhängige Wasserspiegellagen in der Oberauer Schleife für instationäre Modellkalibrierung

Entwässerungsgräben

Im Rahmen der instationären Neukalibrierung des MODFLOW-Modells wurden für einige Entwässerungsgräben anhand der Pegelmessdaten während der Frühjahrsflutung 2015 instationäre Randbedingungen mit zeitabhängigen Wasserspiegellagen angesetzt. Ortsabhängige Wasserspiegellagen wurden entweder mittels linearer Interpolation zwischen an Pegeln gemessenen Wasserständen oder mittels auf Annahmen beruhender Abschätzungen des Gefälles konstruiert. Die Sohl- und Wasserspiegellagen sowie die jeweiligen Pegeldata sind im Bericht [7] Anlagen A-14 bzw. A-15 einzusehen.

6.3 Anpassung des FEFLOW-Modells

Entwässerungsgräben, die durch den höheren Grundwasserspiegel lediglich bei der ökologischen Frühjahrsflutung im Austausch mit dem Grundwasser stehen, wurden aufgrund der in Abschnitt 4.2 erläuterten Unterschiede der beiden Modelle angepasst.

Darüber hinaus wurde an der Kößnach in einem Gewässerabschnitt auf Höhe der neuen Messstelle N5UF die Sohldurchlässigkeit erhöht. Somit wird der Anstieg des Grundwassers an dieser Stelle deutlich besser vom Modell wiedergegeben.

Es stellte sich heraus, dass die Lagekoordinaten von sechs Grundwassermessstellen nicht auf dem neuesten Stand waren. Um eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und der Grundwasserganglinie an den Punkten mit korrigierten Lagekoordinaten zu gewährleisten, mussten vereinzelt Anpassungen vorgenommen werden:

- Im oberen Abschnitt des Hauptkanals wurde die Sohldurchlässigkeit reduziert, um die Anpassung an Messstelle L 94/1 zu verbessern.
- Die Sohldurchlässigkeit des Seitengrabens des Neudaugrabens wurde erhöht, um die Anpassung an Messstelle L 86/1 zu verbessern.

- Um die Anpassung der im Polder Öberau gelegenen Messstellen zu verbessern, wurde die Sohl-durchlässigkeit des Breitenfelder Grabens lokal variiert und darüber hinaus wurden für den Haupt-zweig des Grabens auf Grundlage der dafür vorhandenen Pegeldata zeitabhängige Wasserspie-gellagen konstruiert (siehe Abbildung 1 und Anlage A-11).

Außerdem wurde, wie in Abschnitt 6.5 erläutert, für die Simulation der Frühjahrsflutung 2015 eine ge-ringe Verzögerung für die Entleerung des Vorlandes des oberen Schleifenteils angesetzt. Die Ganglinie des Messpegels Oeber1 und für das überflutete Vorland angewendete Verzögerung sind in Anlage A-12 dargestellt.

6.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die berechneten Grundwasserganglinien sowie die Bilanzen für den Austausch von Oberflächengewässern und Grundwasser vorgestellt.

6.4.1 Grundwasserstände

Die Anlagen A-13.1 bis A-13.34 zeigen die Gegenüberstellung von berechneten und an den Grundwas-sermessstellen gemessenen Ganglinien der Grundwasserhöhen. Es ergibt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit maximalen Differenzen der Grundwasserhöhen kleiner als 0,1 - 0,3 m.

Für die einzelnen Poldergebiete und Ortslagen ergaben sich folgende Feststellungen:

Polder Öberau

(Messstellen: R 123/1, R 124, R 124/1, R 124/2, R 125, R 125/1, L 94/1, L 94/3, L 94/5 /

Anlagen A-13.1 bis A-13.9)

- Im Polder Öberau wird der starke Anstieg der Grundwasserstände im Verlauf der ökologischen Frühjahrsflutung sehr gut vom Modell nachgebildet, mit Abweichungen der maximalen Grundwas-serstände (Scheitelwerte) von weniger als 0,15 m. Lediglich beim Abfall der Grundwasserganglinie nach Erreichen des Maximalerinstaus zeigen sich größere Differenzen, die vermutlich auf einen nicht hinreichend gut im Modell abgebildeten Entleerungsvorgang des überfluteten Vorlandes der Oberauer Schleife (vgl. Abschnitt 6.5). Abflusslose Geländemulden können dazu führen, dass weit-aus länger Oberflächenwasser aus dem Vorland ins Grundwasser einsickert und das Abflachen der Ganglinien somit verzögert.
- An Messstelle R 125 liegt der berechnete maximale Grundwasserstand etwa 0,5 m über dem ge-messenen. Der Grund für die höhere Abweichung ist nicht ersichtlich, aber ein Einfluss der Drai-nagegräben im Polder Öberau ist auszuschließen, da alle anderen, näher an den Gräben befindli-chen Messstellen eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Hinsichtlich der Risikobewertung liegt man mit den zu hoch berechneten Grundwasserständen auf der sicheren Seite der Betrachtung.
- In der Umgebung des Hauptkanals (L94/1, L94/2, L94/3), in der das Grundwasser dem Einfluss von Absetzbecken und dem unteren Teil der Oberauer Schleife ausgesetzt ist, wird der weniger starke Anstieg der Grundwasserstände ebenfalls gut vom Modell wiedergegeben. Darüber hinaus zeigen sich an den in unmittelbarer Nähe des Hauptkanals befindlichen Messstellen L 94/1 und L 94/3 leichte Abweichungen aufgrund der Einflüsse von Niederschlagsereignissen.

Polder Sossau

(Messstellen L 94, L 95, N 6 / Anlagen A-13.9 bis A-13.12)

- An der Grundwassermessstelle L 94 ist der Anstieg infolge der Frühjahrsflutung durch die Vorflut-wirkung des unteren Schleifenteils abgedämpft. Das Modell bildet den Anstieg gut nach, wobei der berechnete maximale Grundwasserstand etwa 0,10 m unter dem gemessenen Wert liegt.
- Die Messstelle L 95 wird stark von den Donauwasserständen (vgl. Abbildung 4) beeinflusst, wodurch die Anstiege Anfang März und Anfang April zu erklären sind. Die berechneten Grundwas-

serstände liegen etwas zu tief, was möglicherweise auf nicht im Modell erfasste Einflüsse des nebenliegenden Drainagegrabens infolge von Regenereignissen zurückzuführen ist. Zudem liegen die Anfangsbedingungen an dieser Stelle deutlich zu niedrig und annähernd stationäre Verhältnisse werden zu keinem Zeitpunkt erreicht. Nennenswerte Auswirkungen der Frühjahrsflutung sind an dieser Messstelle aufgrund der Entfernung nicht zu verzeichnen.

- Die Anstiege des Grundwassers an der Messstelle N 6 sind auf die Donau- und Kößnachwasserstände zurückzuführen. Der charakteristische Verlauf der gemessenen Grundwasserganglinie wird gut vom Modell nachgebildet. Während die durch die Hochwasserspitzen bedingten Scheitelwerte sehr gut vom Modell nachgebildet werden, liegen die Grundwasserstände bei niedrigeren Donauwasserständen etwa 0,35 m zu hoch.

Ortslagen Unterzeitldorn, Sossau

(Messstellen P1, L 96, L 93, N 5UF / Anlagen A-13.13 bis A-13.16)

- Der Einfluss der Frühjahrsflutung auf die Grundwassermessstellen P1, L 96 und L93 wird gut im Modell erfasst. In diesem Gebiet wird der Einfluss der Flutung des oberen Schleifenteils durch die Vorflutwirkung des unteren Teils abgedämpft. Während der maximale Grundwasserstand gut nachgebildet wird, verläuft der Anstieg der Grundwasserstände im Modell etwas langsamer und somit wird der Scheitelwert etwas verzögert erreicht. Auch Niederschlagseinflüsse können die Ursache für die Abweichungen beim Anstieg sein.
- An der etwas nördlicher gelegenen Messstelle N 5UF wird der Anstieg infolge der Flutung des oberen Teils der Oberauer Schleife sehr gut vom Modell wiedergegeben.

Polder Kößnach - West

(Messstellen L 83/1, L 85/1, L 85UF, L 85/2, L 86/1, L 86N, L 87/1, L 87A, L 87/2 / Anlagen A-13.17 bis A-13.25)

- In dem Gebiet zwischen der Oberauer Schleife und der Pittricher Rinne steigt das Grundwasser infolge der Flutung des oberen Schleifenteils um 0,7 bis 1,3 m. Während an den Grundwassermessstellen L 86N die Messwerte vor der Frühjahrsflutung etwa 0,3 m zu hoch liegen, wird der Anstieg und Scheitelwert gut vom Modell nachgebildet. An der Messstelle L 86/1 wird der Anstieg infolge der Frühjahrsflutung insgesamt gut vom Modell wiedergegeben.
- An den Messstellen L 85UF und L 85/1 ist sowohl der Einfluss der Frühjahrsflutung als auch der Einfluss von zwei Niederschlagsereignissen Ende Februar und Anfang März zu sehen. Während bei L 85/1 der Scheitelwert relativ gut nachgebildet wird, liegen die berechneten Grundwasserstände an Messstelle L 85UF aufgrund der Dominanz der Niederschlagseinflüssen deutlich niedriger als die gemessenen.
- Bei den gemessenen Ganglinien der nahe der Schmalwand gelegenen Messstellen L 85/2 und L 83/1 dominieren die Einflüsse der Niederschlagsereignisse, die zu zwei markanten Anstiegen des Grundwassers führen, während kein nennenswerter Einfluss der Flutung der Oberauer Schleife mehr zu verzeichnen ist. Die vom Modell berechneten Ganglinien zeigen daher keinen nennenswerten Anstieg der Grundwasserstände während des Simulationszeitraums.

Polder Kößnach - Ost/Nord

(Messstellen N 1, N 2, N 3, L 82, N 4 / Anlagen A-13.26 bis A-13.30)

- An den Messstellen L 82 und N 4 wird der Verlauf der gemessenen Grundwasserganglinie maßgeblich von Niederschlagsereignissen geprägt, sodass sich Ende Februar und Anfang März starke Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Werten ergeben. Der aufgrund der Nähe zur Oberauer Schleife starke Grundwasseranstieg bei N 3 wird gut vom Modell nachgebildet, wobei auch an dieser Messstelle eine Überlagerung der Einflüsse von Niederschlagsereignissen erkennbar ist.

- Der Grundwasseranstieg infolge der Flutung der Oberauer Schleife wird östlich der Kößnach durch die Vorflutwirkung des Fließgewässers stark abgedämpft. Die Frühjahrsflutung wirkt sich daher kaum auf die Messstellen N 1 und N 2 aus. Bei N 2 ist allerdings deutlich der Einfluss von Niederschlagsereignissen zu verzeichnen, sodass das Grundwasser an dieser Messstelle zu keinem Zeitpunkt annähernd stationäre Verhältnisse erreicht und die vom Modell simulierten Grundwasserhöhen konstant etwas tiefer als die gemessenen Werte liegen. Das Bohrprofil von Messstelle N 2 weist keine Deckschicht aus Schluff oder noch undurchlässigerem Material auf, sodass zumindest lokal von einer höheren Grundwasserneubildung infolge von Niederschlägen ausgegangen werden kann. An der Messstelle N 1 wird der Verlauf der Grundwasserganglinie gut nachgebildet, wobei die berechneten Grundwasserhöhen um bis zu 0,10 m über den gemessenen Werten liegen.

Polder Hornstorf

(Messstellen L 100, L 101, L 103/1, L 103/2 / Anlagen A-13.31 bis A-13.34)

- Der Ganglinienverlauf an der Messstelle L 103/1 wird von der Donau-Ganglinie geprägt. Der Verlauf wird vom Modell gut wiedergegeben, mit maximalen Abweichungen von bis zu 0,3 m am Ende des Simulationszeitraumes.
- Bei den gemessenen Ganglinien der am Hornstorfer Graben gelegenen Messstellen L 100 und L 103/2 sind Einflüsse von Niederschlagsereignissen Ende Februar und Anfang März zu erkennen. Diese Niederschlagsereignisse wirken sich ebenso auf die Messstelle L 101 aus, an der das Modell lediglich die Grundwasseranstiege infolge der Donauhochwasser nachbildet.

Bei der Auswertung der Grundwasserganglinien wurden Einflüsse mehrerer Niederschlagsereignisse auf die gemessenen Grundwasserstände identifiziert. Die Auswirkung von Niederschlagsereignissen auf die Abflüsse bzw. Wasserstände in den Entwässerungsgräben und auf die als konstant angenommene Grundwasserneubildung sind im Modell nicht abgebildet. Besonders vor und zu Beginn des Simulationszeitraumes sowie Ende Februar und Anfang März kommt es daher aufgrund von größeren Niederschlagsereignissen zu Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserhöhen. Abhängig von der Lage der Messstelle kommt den Niederschlägen eine unterschiedlich große Bedeutung zu. Abbildung 6 zeigt die Auswirkungen von Niederschlägen auf eine Messstelle (L 83/1) im Polder Kößnach, die aufgrund ihrer Entfernung zur Oberauer Schleife von der Frühjahrsflutung nur relativ gering beeinflusst wird.

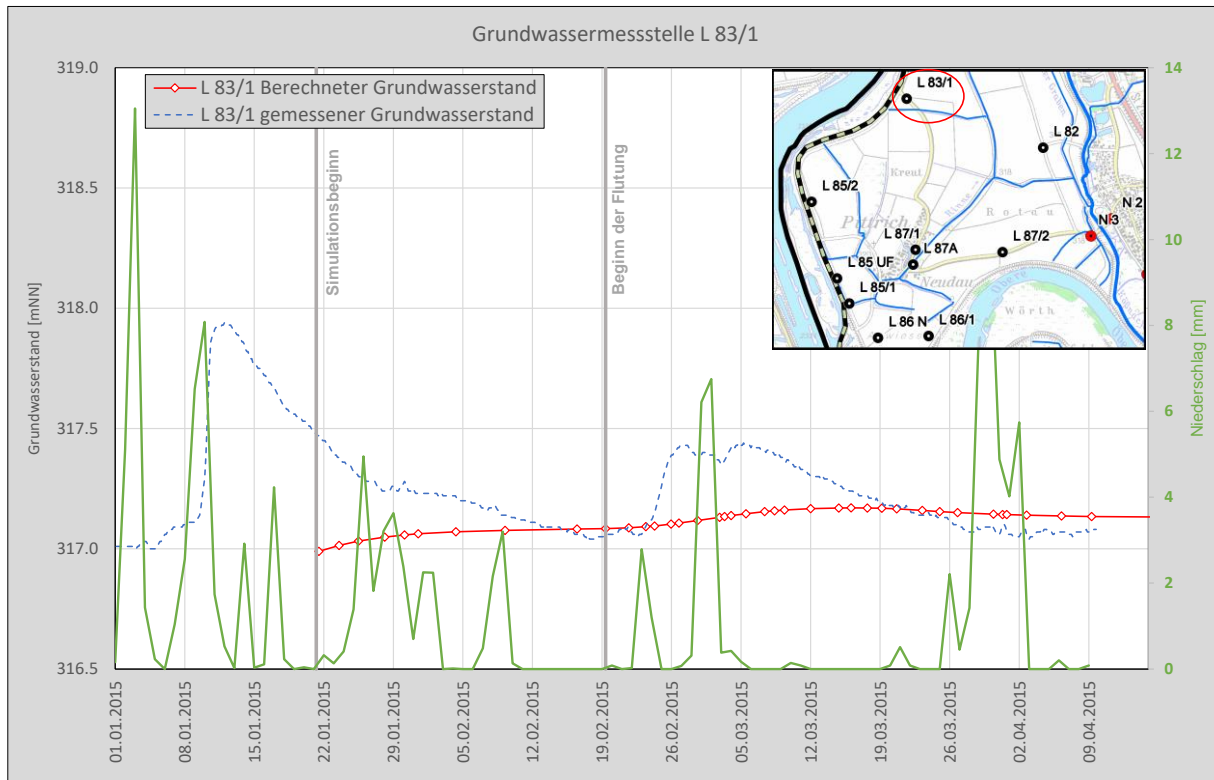


Abbildung 6: Gemessene und berechnete Grundwasserstände an der Messstelle L 83/1 sowie mittlere Tagessummen der gemessenen Niederschläge an den Stationen Aholting, Straubing, Bogen-Pfelling und Steinach

6.4.2 Wasserbilanzen

In den Anlagen A-14 sind die mit dem Grundwassermodell berechneten Bilanzen für den Austausch von Oberflächengewässern und Gräben mit dem Grundwasser zusammengestellt.

- Die Bilanz in Anlage A-14.1 zeigt die Zu- und Aussickerungsraten in der Oberauer Schleife. Der Flussschlauch der oberen Schleifenteils erreicht zu Beginn der Flutung eine maximale Infiltrationsrate von etwa 150 l/s, während auf dem überschwemmten Vorlandbereich die maximale Infiltrationsrate von 317 l/s zum Zeitpunkt der maximalen Einstauhöhe bzw. Einstaufläche erreicht wird. Im unteren Teil der Oberauer Schleife kommt es dagegen erwartungsgemäß zu erheblichen Aussickerungen von bis zu 190 l/s.
- Im Polder Öberau (siehe Anlage A-14.2) kommt es im Breitenfelder Graben zu starken Aussickerungen von bis zu 35 l/s. Am Hauptkanal sind die Aussickerungsraten kleiner, da die Grundwasseranstiege in diesem Bereich geringer ausfallen.
- Aus den Bilanzen der Gräben (Anlage A-14.3) im Polder Kößnach und Polder Hornstorf geht hervor, dass es hauptsächlich an der Pittricher Rinne während der Frühjahrsflutung zu einer größeren Zunahme der Exfiltrationsmenge kommt. Die Schwankungen der Zu- und Aussickerungsraten am Hornstorfer Graben sind durch die Änderungen der Donauwasserstände bedingt.

In den Anlagen 14a werden die mit Hilfe des Grundwassermodells berechneten In- und Exfiltrationsraten an ausgewählten Stellen mit den gemessenen Abflüssen in den Entwässerungsgräben verglichen. Gegenüber den Ergebnissen des MODFLOW-Modells ergeben sich hier keine nennenswerten Unterschiede. Die in [7] für das MODFLOW-Modell gewonnenen Erkenntnisse gelten somit auch für das FEFLOW-Modell.

6.5 Diskussion

Die instationäre Simulation der ökologischen Frühjahrsflutung 2015 zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen. Die durch die Flutung der Öberauer Schleife verursachten maximalen Grundwasserstände werden in allen Bereichen gut vom Modell reproduziert. Durch im Modell nicht hinreichend gut erfassbare Niederschlagsereignisse kommt es sowohl zu Beginn der Simulation als auch während der Frühjahrsflutung teilweise zu Abweichungen. Das FEFLOW-Modell liefert insgesamt mit MODFLOW vergleichbare Ergebnisse, an manchen Messstellen liegt FEFLOW durch vereinzelte Anpassungen sogar etwas näher an den gemessenen Werten.

Die bereits mit dem MODFLOW-Modell an mehreren im Polder Öberau gelegenen Messstellen beobachtbaren Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserhöhen beim Abflachen der Ganglinie wurden auch mit dem FEFLOW-Modell festgestellt. Wie von Björnsen Beratende Ingenieure im Kalibrierungsbericht [2] (Abschnitt 2.3.2.1) bereits angedeutet, liegt die Vermutung nahe, dass der Entleerungsvorgang des überfluteten Vorlands aufgrund von abflusslosen Geländemulden tatsächlich deutlich langsamer verläuft als der am Pegel Oeber1 gemessene Rückgang des Wasserstandes im oberen Schleifenenteil, der als Vorgabe für die gesamte Gewässerrandbedingung dient. Somit infiltriert in Wirklichkeit länger Oberflächenwasser und bedingt die höheren gemessenen Grundwasserstände. Da die räumliche Verteilung und die Wirkung von solchen Geländemulden nicht ohne Weiteres zu ermitteln ist, kann dieser Einfluss lediglich durch eine auf Annahmen beruhende Verzögerung der Benetzung und der damit verbundenen Infiltration von überfluteten Vorland-Leakageknoten approximiert werden. Für die Simulation der in Anlage A-13 vorgestellten Modellergebnisse wurde lediglich eine geringe Verzögerung für das überflutete Vorland angenommen.

Abbildung 7 und Abbildung 8 veranschaulichen anhand von zwei Beispielen, inwieweit Grundwassermessstellen im Polder Öberau auf eine Verzögerung der Benetzung der Vorland-Leakageknoten reagieren.

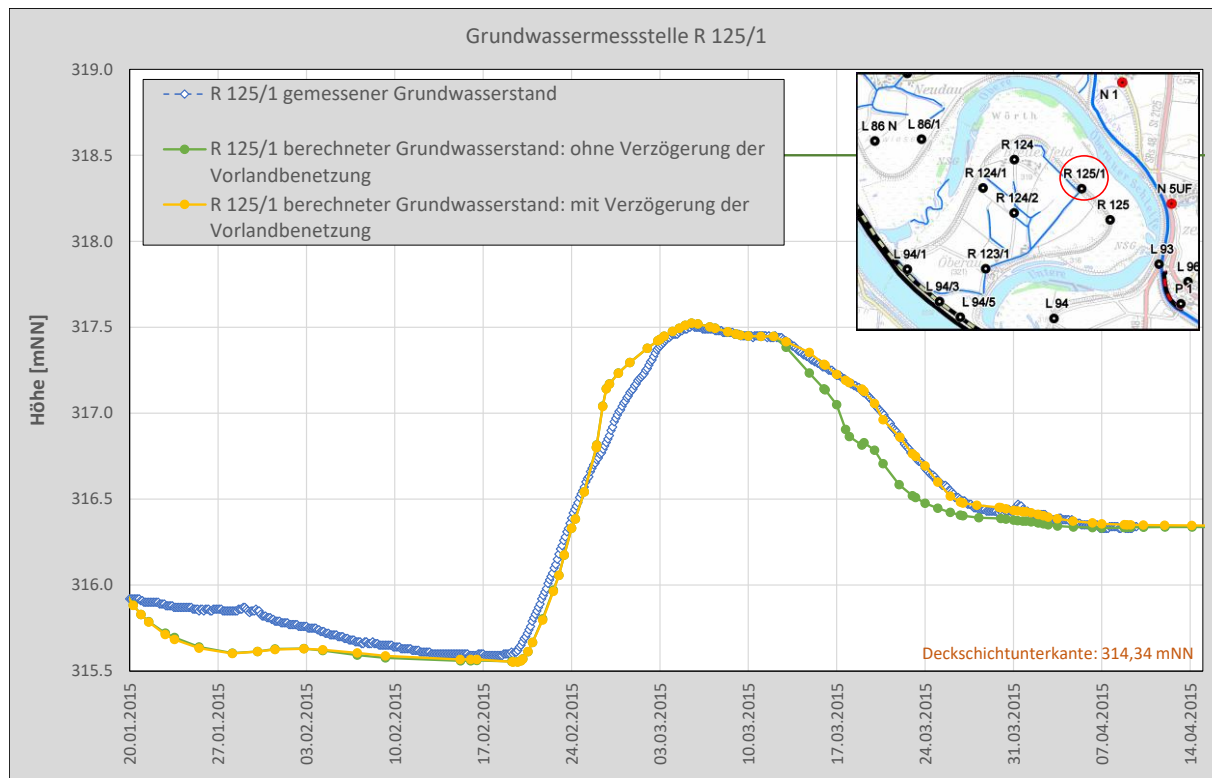


Abbildung 7: Einfluss der verzögerten Vorlandbenetzung auf die Grundwasserganglinie für Messstelle R125/1

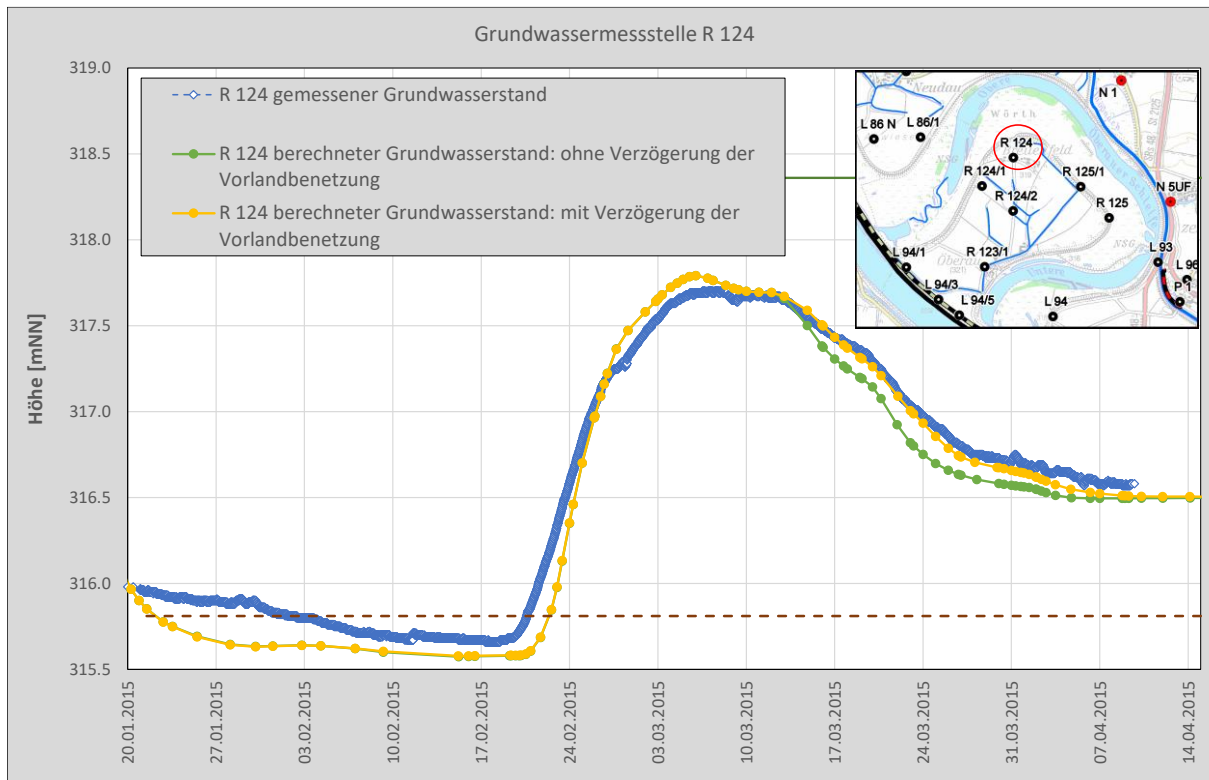


Abbildung 8: Einfluss der verzögerten Vorlandbenetzung auf die Grundwasserganglinie für Messstelle R124

7 Planzustand Alternative 3

Auf Grundlage der Entscheidungsvorlage [8] wurde im März 2017 seitens des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz beschlossen, dass die Hochwasserrückhaltung Oberauer Schleife auf Basis der Planungsvariante „Alternative 3“ fortgesetzt werden soll.

Diese Variante sieht vor, dass im Hochwasserfall neben der durch die bestehenden Donaudeiche begrenzten Oberauer Schleife zusätzlich der Polder Sossau West sowie der gesamte Polder Oberau geflutet werden. Das Stauziel im Poldergebiet beträgt 320,20 mNHN. Anlage A-16 zeigt eine Übersicht der einzelnen Poldergebiete für die Alternative 3. Eine detaillierte Beschreibung der aktivierbaren Retentionsvolumina sowie der Überlaufschwelen der einzelnen Poldergebiete ist in Kapitel 6.1. bzw. 6.3. der Entscheidungsvorlage [8] nachzulesen.

Mit Hilfe des kalibrierten FEFLOW-Modells wurden für den Planzustand Alternative 3 die Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse untersucht. Dabei wurde als Referenzzustand zunächst der Ist-Zustand berechnet, in dem die Oberauer Schleife im Hochwasserfall nicht als Rückhalteraum in Anspruch genommen wird. Darauf aufbauend wurden die sich für den Planzustand ergebenden Differenzen der maximalen Grundwasserhöhen sowie die Differenzen der maximalen Infiltrations- bzw. Exfiltrationsraten der einzelnen Gewässer ermittelt.

7.1 Modellparameter und Randbedingungen

Der Simulation des Ist- und des Planzustandes liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Als Ausgangsgrundwasserstände für die Modellrechnung werden mittlere Grundwasserverhältnisse zugrunde gelegt.

- Die Grundwasserneubildung wird über den gesamten Simulationszeitraum konstant gehalten. Die räumliche Differenzierung der Grundwasserneubildungsrate wurde entsprechend der Verteilung in Anlage A-3 angesetzt.

Die Oberflächenwasserhydraulik des Ist- und des Planzustandes wurde mittels einer eindimensionalen Strömungsmodellierung eigens für die Grundwassersimulation berechnet. Dazu wurde das HQ₃₀ der Donau mit einem HQ₃ der Kößnach überlagert. Mit dem hydraulischen Modell wurden somit zeitabhängige Wasserspiegellagen für die Flussabschnitte Donau-Oberwasser (Stauhaltung), Donau-Südarms und Donau-Nordarm Straubing, Donau-Unterwasser und Kößnach sowie für die einzelnen Flutpolder ermittelt.

Die 1D-Berechnungen unterlagen dabei folgenden Annahmen:

- Die Kappung der Hochwasserwelle in der Donau erfolgt horizontal
- Die Ausleitungsabflussmenge richtet sich nach dem Rückhaltevolumen der jeweiligen Variante, welches wiederum aus dem vorgegebenen Stauziel in den Flutpoldern folgt
- Die verschiedenen Flutpolder fungieren als Rückhalteräume, die sich auf der gesamten Fläche gleichmäßig füllen und entleeren

Donau und Kößnach

In Abbildung 9 ist die Abflussganglinie der Donau für HQ₃₀ auf Höhe des nördlichen Modellrandes des Grundwassermodells (Donau-km 2340,0) dargestellt. Die Abflussganglinie wurde vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Der Scheitelabfluss HQ₃₀ in der Donau beträgt 2800 m³/s.

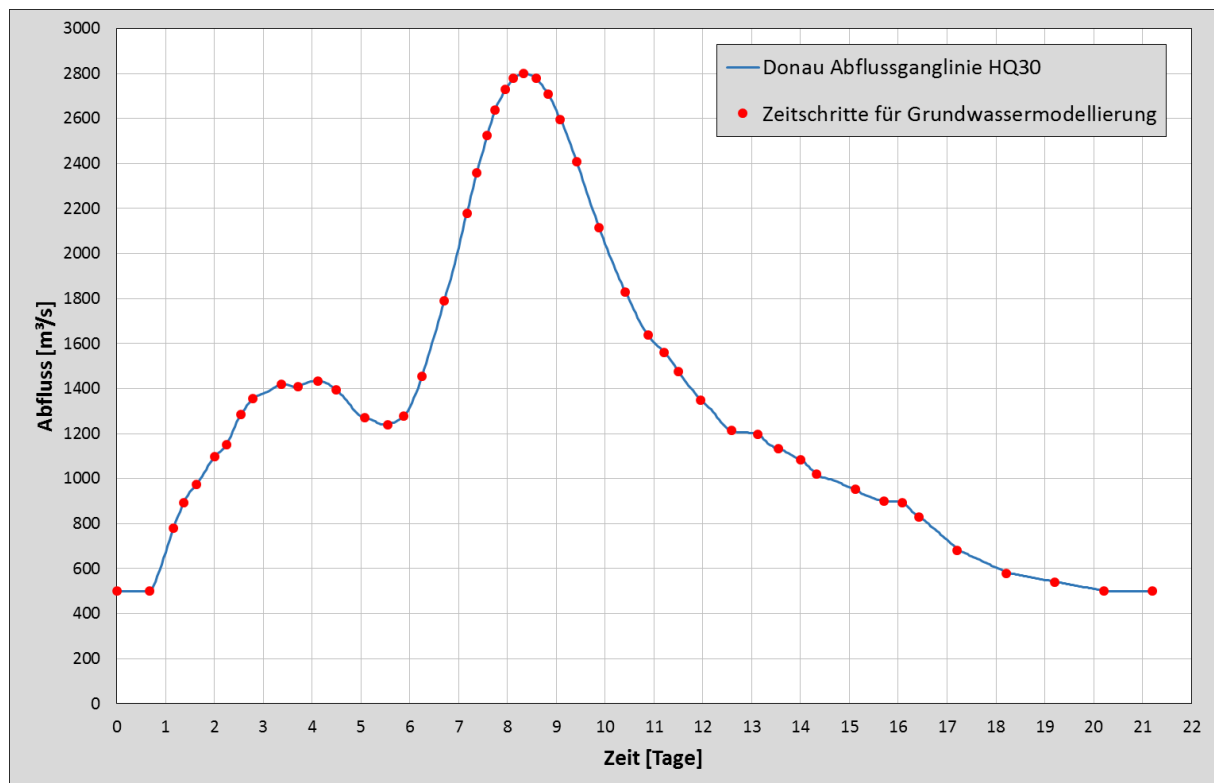


Abbildung 9: Abflussganglinie für HQ₃₀ der Donau am nördlichen Modellrand mit Zeitschritten für das Grundwassermodell

Der Zeitraum der Grundwassersimulation umfasst 21 Tage. Die Wahl der Zeitschritte für die Grundwassersimulationen richtet sich nach dem Verlauf der Hochwasserwelle der Donau. Die Dauer der Zeitschritte variiert zwischen 4 und 24 Stunden.

Die für die Kößnach verwendete Abflussganglinie für HQ₃ am nördlichen Modellrand ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Abflussganglinie stammt aus einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Der Scheitelabfluss HQ₃ in der Kößnach beträgt 13 m³/s.

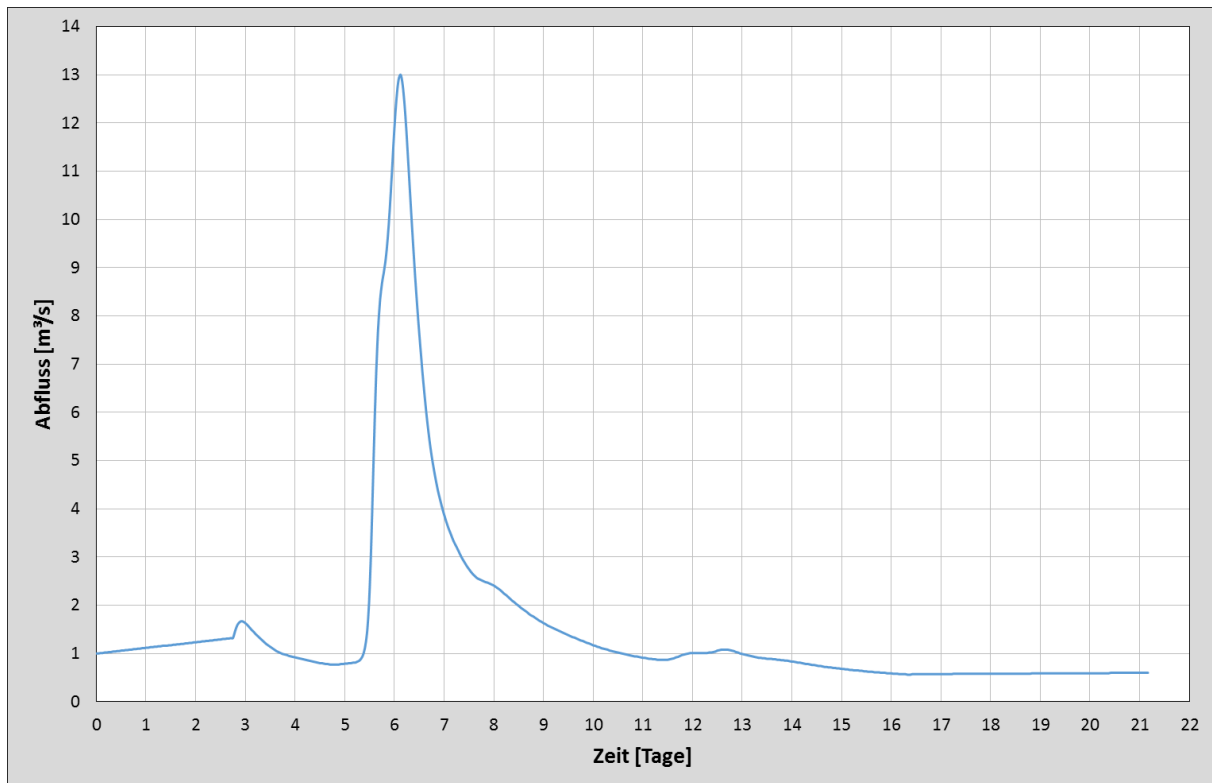


Abbildung 10: Abflussganglinie für HQ₃ der Kößnach am nördlichen Modellrand

Flutpolder

Im Ist-Zustand wird im oberen Teil der Oberauer Schleife von einer Wasserspiegellage von 316,20 mNN und im unteren Teil von 315,80 mNN ausgegangen. Diese Wasserspiegellagen werden auch für die Simulation der beiden Planzustände jeweils vor und nach der Flutung als Randbedingungen für das Grundwassermodell angesetzt.

In Anlage A-16 sind die einzelnen Poldergebiete und Einstauflächen für den Planzustand dargestellt. Die Flutungsvorgänge für die einzelnen Poldergebiete sind in Abbildung 11 dargestellt.

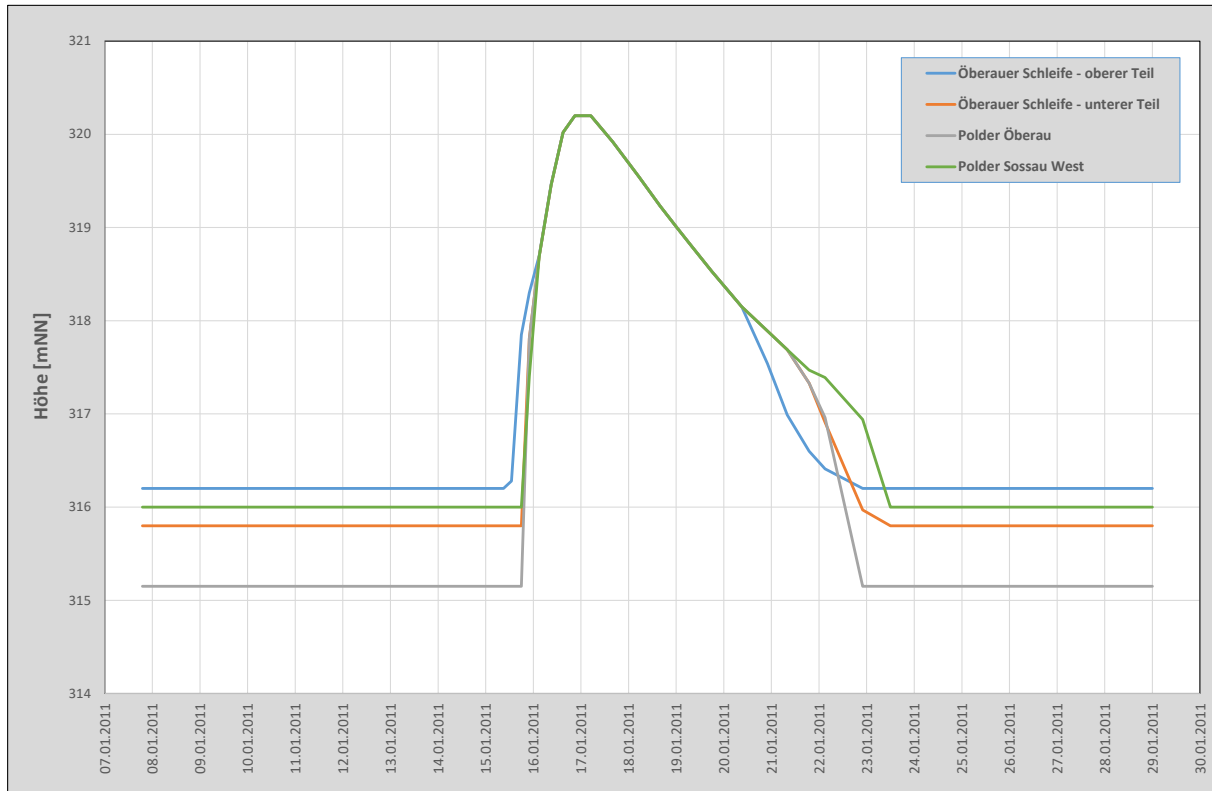


Abbildung 11: Flutungsverlauf in den einzelnen Poldergebieten

Entwässerungsgräben

Die Wasserspiegellagen der Entwässerungsgräben im Modellgebiet entsprechen den Randbedingungen der stationären Modellkalibrierung und wurden über den gesamten Simulationszeitraum konstant gehalten. Eine Ausnahme bildet der Hornstorfer Graben, dessen Wasserspiegel mit dem Donauwasserspiegel korrespondiert. Beim Hornstorfer Graben wurde davon ausgegangen, dass das Siel beim Schöpfwerk Hornstorf ab einem Donauwasserspiegel von 315,10 mNN geschlossen wird.

7.2 Anpassungen des FEFLOW-Modells

Für die Simulation des Planzustandes Alternative 3 wurde das Finite-Elemente-Modellnetz gegenüber dem Kalibrierungszustand modifiziert:

- Für die beiden Ortslagen Öberau und Breitenfeld im Polder Öberau wurden entlang der Verläufe der geplanten Ringdeiche Untergrundabdichtungen eingebaut, die im Hochwasserfall die bebauten Flächen vor aussickerndem Grundwasser schützen.
- Um das Kößnach-Hochwasser im Planzustand besser simulieren zu können, wurde die Abbildung des Fließgewässers im Modell verändert und dem HQ₃₀ angepasst. Die Infiltrationsflächen des Flussschlauchs einerseits und des überfluteten Vorlandes andererseits sind nun entsprechend der mit dem hydraulischen Modell ermittelten Überflutungsflächen angepasst.

7.3 Modellergebnisse

7.3.1 Ist-Zustand

Bedingt durch höhere Wasserspiegellagen in Kößnach und Donau sowie deren Überflutungsgebieten kommt es in diesen Bereichen zu erhöhten Zusickerungen in das Grundwasser.

Die maximalen Grund- bzw. Druckwasserstände sind in Anlage A-15.1 dargestellt.

- Auf Höhe der Ortslage Kößnach kommt es östlich und westlich der Kößnach zu maximalen Grundwasserständen von 317,50 mNN bis 318,00 mNN. Westlich der Kößnach ergeben sich somit Bereiche, in denen der Druckwasserspiegel bis zu 0,5 - 1,0 m über Geländeoberkante (GOK) liegt.
- Im weiter von der Kößnach entfernt gelegenen Teil des Polders Kößnach sind nur geringe Einflüsse des Kößnach-Hochwassers auf das Grundwasser zu verzeichnen. Ein Einfluss des Donauhochwassers in diesem Bereich ist durch die Untergrundabdichtung des Stauhaltungsdamms weitgehend unterbunden. Es ergeben sich maximale Grundwasserstände von 316,50 mNN bis etwa 317,00 mNN.
- Im Polder Öberau kommt es zu maximalen Grundwasserständen zwischen 316,00 mNN und 316,50 mNN.
- Das Grundwasser im Bereich Polder Sossau ist während des Hochwassers gleichzeitig Infiltrationen aus der Kößnach und aus dem Nordarm Straubing der Donau ausgesetzt. Zwischen dem unteren Teil der Oberauer Schleife und der Kößnach kommt es daher zu maximalen Grundwasserständen von 316,00 mNN bis 318,00 mNN, teils abgedämpft durch den Entwässerungsgraben im östlichen Teil des Polders Sossau. Im östlichen Teil des Polders Sossau liegen die Druckwasserstände überwiegend zwischen 0,5 m und 2,0 m über GOK.
- Die Ortslage Sossau befindet sich in einem potentiellen Vernässungsbereich, in dem der Druckwasserspiegel in Kößnachnähe bis zu 1,0 m über GOK liegt.
- Entlang des Unterwassers der Donau, vor allem im südwestlichen Teil der Ortschaft Hornstorf, werden maximale Grundwasserstände von 318,00 mNN bis 318,50 mNN erreicht. Diese liegen bis zu 1,5 m über GOK.

7.3.2 Planzustand Alternative 3

Maximale Grundwasserstände

Durch den Einstau in den Poldergebieten ergeben sich starke Anstiege des Grundwassers in den umliegenden Bereichen. Die berechneten maximalen Grund- bzw. Druckwasserstände sind in Anlage A-17 und die sich daraus ergebenden Differenzen zum Ist-Zustand in Anlage A-18 dargestellt.

- Im Polder Kößnach zwischen der Oberauer Schleife und den Ortslagen Pittrich/Neudau ergeben sich Druckwasserspiegeldifferenzen zum Ist-Zustand zwischen 0,25 m und 3,75 m. In der Umgebung der Oberauer Schleife liegen die Druckwasserstände bis zu 1,5-2,0 m über GOK, in der Nähe der Kößnach bis zu 2,5 m. In den Ortslagen Neudau/Pittrich liegt der Druckwasserspiegel unter GOK.
- Im Polder Sossau Ost zwischen der Westtangente und der Kößnach steigt der Druckwasserspiegel im Vergleich zum Ist-Zustand zwischen 0,1 m und 2,75 m. Dadurch liegen die Druckwasserstände bis zu 2 m über GOK, in unmittelbarer Nähe der Kößnach und Donau sogar bis zu 2,5 m.
- Für die Ortslage Sossau im Polder Hornstorf ergeben sich lediglich geringe Differenzen von höchstens 0,1 m zum Ist-Zustand. Dieses Gebiet befindet sich aufgrund des Kößnach-Hochwassers wie bereits im Ist-Zustand in einem potentiellen Vernässungsbereich.

- In der Ortschaft Hornstorf ist keine nennenswerte Veränderung der Grundwasserhöhen gegenüber dem Ist-Zustand festzustellen.
- Östlich der Ortschaft Kößnach ergeben sich keine Veränderungen gegenüber dem Ist-Zustand.

Austausch Oberflächengewässer-Grundwasser

Die maximalen Infiltrations- bzw. Exfiltrationsraten in den verschiedenen Gewässern und Poldergebieten für Ist-Zustand und Planzustand sind in Anlage A-19 tabellarisch zusammengestellt:

- Erwartungsgemäß ergeben sich für die Oberauer Schleife und die überfluteten Vorländer hohe Infiltrationsraten.
- Die größten Anstiege der Exfiltrationsraten für das Binnentwässerungssystem ergeben sich für Pittricher Rinne und Neudaugraben, die den starken Anstiegen des Grundwassers infolge des Einstaus ausgesetzt sind.
- Im Graben im Polder Sossau Ost exfiltriert durch den Einstau des Polders Sossau West noch mehr Grundwasser als im Ist-Zustand, in dem die Aussickerungen lediglich auf Donau- und Kößnachhochwasser zurückzuführen sind.

8 Sensitivitätsanalyse

Bei der Festlegung und Anpassung von Parametern eines Grundwassermodells sind teilweise Annahmen erforderlich, die die Modellergebnisse beeinflussen. Die Empfindlichkeit bzw. Robustheit des Modells gegenüber den Hauptparametern wurde daher im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die Sensitivitätsanalyse wurde für den Planzustand Alternative 3 durchgeführt und umfasst die Untersuchung der folgenden Parameter:

- Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte)
Variation der k_f -Werte im gesamten Modellgebiet um eine Zehnerpotenz (Faktor 10 bzw. 1/10)
- Durchlässigkeit der Gewässersohlen
Variation der Durchlässigkeiten der Gewässersohlen (transfer rates) im gesamten Modellgebiet um eine Zehnerpotenz (Faktor 10 bzw. 1/10). Die Variation schließt die Oberauer Schleife inkl. Überflutungsflächen, die Polder Sossau und Öberau sowie die Kößnach und sämtliche Entwässerungsgräben ein.
- Grundwasserneubildung
Variation der Grundwasserneubildungsraten im gesamten Modellgebiet um $\pm 25\%$.

Die Auswertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse erfolgte anhand der sich ergebenden Differenzen der maximalen Grund- bzw. Druckwasserstände sowie der Austauschmengen zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser.

8.1.1 Sensitivität k_f -Werte

Die Ergebnisse der Untersuchung der Sensitivität des Modells gegenüber einer Variation der k_f -Werte sind in Anlage A-20 dargestellt. Dabei ist Folgendes festzustellen:

- Die Erhöhung der k_f -Werte um eine Zehnerpotenz führt auf den Pittricher Wiesen um einen Anstieg der maximalen Druckwasserstände von bis zu 1,0 m. Diese Anstiege bedingen eine deutlich höhere Exfiltration in den Entwässerungsgräben in diesem Gebiet. Ebenso steigen in den Poldern Sossau Ost, Hornstorf und Reibersdorf die maximalen Druckwasserstände um bis 1,5 m an, wodurch sich die Aussickerungsmengen in den Gräben erhöhen (vgl. Anlage A-20).

- Durch die Verringerung der k_f -Werte um eine Zehnerpotenz kommt es im Polder Kößnach um eine Reduzierung der maximalen Druckwasserstände um bis zu -1 m. In den Poldern Sossau, Hornstorf und Reibersdorf sinken die maximalen Druckwasserstände um bis zu -2,25 m in unmittelbarer Nähe des Unterwassers der Staustufe Straubing.

Insgesamt ist eine relativ hohe Sensitivität des Grundwassermodells gegenüber der Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte festzustellen. Im ungünstigeren Fall der Erhöhung der k_f -Werte steigen die maximalen Druckwasserstände um bis zu 1,5 m und führen zu merklich höheren Austauschmengen in den Entwässerungsgräben.

8.1.2 Sensitivität Sohldurchlässigkeiten

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Variation der Sohldurchlässigkeiten der Gewässer sind in Anlage A-21 dargestellt. Dabei ist folgendes festzustellen:

- Durch die Erhöhung der Sohldurchlässigkeiten exfiltriert in den Entwässerungsgräben mehr Grundwasser, sodass die maximalen Druckwasserstände etwas niedriger liegen. Im Polder Kößnach sinken die maximalen Druckwasserstände um bis zu -0,75 m im Bereich um Neudaugraben/Pittricher Rinne. Der durch den Einstau sowie durch das Donauhochwasser bedingte starke Anstieg des Grundwassers im östlichen Teil des Polders Sossau wird durch die höhere Sohldurchlässigkeit des Grabens abgedämpft um bis zu -1,5 m. Somit steigen die maximalen Exfiltrationsraten in den Entwässerungsgräben, insbesondere auch in den Gräben südlich des Schöpfwerks Kößnach (vgl. Anlage A-21.2).
- Durch die Verringerung der Sohldurchlässigkeiten wird die Exfiltration in den Entwässerungsgräben gehemmt, sodass die maximalen Druckwasserstände im Polder Kößnach, Polder Hornstorf sowie im Polder Sossau Ost um bis zu 0,75 m ansteigen. Die niedrigen Austauschmengen in den Gewässern sind in Anlage A-21.2 tabellarisch zusammengestellt.

Auch gegenüber den Sohldurchlässigkeiten lässt sich eine relativ hohe Empfindlichkeit des Modells feststellen. Die Sohldurchlässigkeiten wirken sich direkt auf die Austauschmengen von Oberflächengewässern und Grundwasserbereich aus, wodurch sich deutliche Unterschiede bei den Sickerwassermengen ergeben.

8.1.3 Sensitivität Grundwasserneubildung

Die Sensitivitätsanalyse zur Variation der Grundwasserneubildung ist in Anlage A-22 zusammengestellt. Die Untersuchung ergab, dass die maximalen Druckwasserstände für den Planzustand Alternative 3 nur in sehr geringem Maße von der einer 25%igen Erhöhung oder Verringerung der über den Simulationszeitraum konstanten gehaltenen Grundwasserneubildungsrate beeinflusst werden. Es ergeben sich Veränderungen von unter 0,1 m, die zu keinen nennenswerten Anstiegen oder Abfällen der maximalen Austauschmengen von Oberflächengewässern und Grundwasser führen. Daher zeigt die Karte in Anlage A-22 keine Isolinien für die Absenkung bzw. den Anstieg des Grundwassers.

9 Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheitsanalyse dient in erster Linie dazu, die Sicherheit der Modellergebnisse durch Angabe eines Vertrauensbereichs zu charakterisieren. Auf eine Sicherheitsanalyse basierend auf dem Ansatz von Monte-Carlo-Simulationen wurde hier in Abstimmung mit dem Auftraggeber verzichtet. Stattdessen erfolgt hier die Analyse der Sicherheit der Modellergebnisse durch Beurteilung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte der Grundwassermodellierung.

Bei einem Grundwassermodell kann man grundsätzlich folgende Hauptbereiche unterscheiden, in denen Unsicherheiten entstehen:

- Unsicherheiten des hydrogeologischen Modells

- Unsicherheiten der Modelleingangsdaten und Modellparameter
- Unsicherheiten der Modellkalibrierung
- Unsicherheiten der Prognoserechnungen

Unsicherheiten des hydrogeologischen Modells

Die Erstellung des hydrogeologischen Modells der Oberauer Schleife erfolgte durch das Ingenieurbüro BCE und ist in [1] bzw. in Unterlage 05-04-01 - Teil 1 Hydrogeologisches Modell ausführlich dokumentiert. Das Modell zeichnet sich aus durch:

- Gute und genaue Erfassung der geologischen Verhältnisse anhand umfangreicher Daten und Informationen aus geologischen Bohrungen und Baugrunduntersuchungen
- Gute räumliche Abgrenzung des Grundwasserleiters (Aquiferoberkante und -unterkante, Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der darüber liegenden Deckschicht) aus den geologischen Sondierungen
- Gute Erfassung der Grundwasserverhältnisse anhand von Messdaten zahlreicher im Untersuchungsgebiet vorhandener Grundwassermessstellen (langjährige und detaillierte Zeitreihen der Grundwasserhöhen)
- Gute Erfassung der für die Grundwassermodellierung relevanten Gebietsstrukturen wie Fließgewässer, Entwässerungsgräben, Deiche, Untergrundabdichtungen, Geländeoberkante aus sehr guter Datengrundlage
- Sinnvolle Wahl und Festlegung der Modellränder

Aufgrund der guten oben genannten Eigenschaften kann das hydrogeologische Modell als genau und zuverlässig eingestuft werden. Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem hydrogeologischen Modell sind daher als relativ gering zu anzusehen.

Unsicherheiten der Modelleingangsdaten und Modellparameter

Die Güte und Zuverlässigkeit der für die Grundwassermodellierung verwendeten Eingangsdaten und Parameter lässt sich wie folgt beurteilen:

- Angaben über Durchlässigkeit des Grundwasserleiters aus Pumpversuchen, Baugrunduntersuchungen und aus früheren Grundwassermodelluntersuchungen lagen vor. Diese Angaben wurden als Ausgangswerte für die Modellierung verwendet. Die endgültige Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte erfolgte im Rahmen der Modellkalibrierung und -validierung, welche insgesamt gute bis sehr gute Ergebnisse gezeigt hat. Daher können die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte als genau und zuverlässig beurteilt werden.
- Daten und Informationen über Grundwasserneubildung aus Niederschlägen lagen ebenfalls vor. Wegen der schwierigen Bestimmung dieses Modellparameters ist hier eine gewisse Unsicherheit vorhanden. Dennoch haben die Untersuchungen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ergeben, dass dieser Modellparameter für die Grundwassermodellierung nur von untergeordneter Bedeutung ist. Für die Unsicherheitsanalyse spielt daher die Grundwasserneubildung keine wesentliche Rolle.
- Besonders wichtig für das Grundwassermodell Oberauer Schleife ist eine genaue Erfassung des Austauschs zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser. Dieser wird im Grundwassermodell mit Hilfe des Leakage-Ansatzes berechnet. Dabei sind Angaben zur Geometrie und Wasserspiegellage der Gewässer sowie zur Durchlässigkeit der Gewässersohle (Leakagekoeffizient) erforderlich. Genaue Angaben zur Gewässergeometrie aus Querprofilaufnahmen lagen für die wichtigsten Gewässer und Entwässerungsgräben vor. Mit Hilfe dieser Daten wurden unterschiedliche hydraulische Modelle erstellt, die zur Berechnung der Wasserspiegellagen eingesetzt wurden. Der Detaillierungsgrad der hydraulischen Modelle ist hoch, so dass die damit berechneten Wasserspie-

gellagen als genau und zuverlässig betrachtet werden können. Lediglich Angaben zur Durchlässigkeit der Gewässersohle waren nicht vorhanden. Diese mussten im Rahmen der Modellkalibrierung ermittelt werden. Die auch hier recht gute erzielte Übereinstimmung zwischen Modell und Natur bei den Kalibrierungsläufen deutet auf genaue und zuverlässige Werte der verwendeten Leakagekoeffizienten hin.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die verwendeten Eingangsdaten und Parameter für das Grundwassermodell insgesamt ein hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit aufweisen.

Unsicherheiten der Modellkalibrierung

Wie bereits oben beschrieben, wurden die Hauptparameter des Grundwassermodells mittels Kalibrierung bestimmt. Neben einer stationären Modellkalibrierung für die mittlere Grundwasserströmung des Zeitraums 1995-2006 wurde eine instationäre Kalibrierung für die jährliche Frühjahrsflutung 2015 vorgenommen. Außerdem wurden im Rahmen der Neukalibrierung des MODFLOW-Grundwassermodells instationäre Modellvalidierungen für die Frühjahrsflutungen 1998 und 2016 durchgeführt (s. [7]).

Bei allen durchgeführten Grundwassersimulationen zur Kalibrierung und Validierung des Grundwassermodells wurde eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserhöhen erzielt. Bei der stationären Modellkalibrierung für die mittlere Grundwasserströmung des Zeitraums 1995-2006 liegen die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserhöhen von 90% der betrachteten Grundwassermessstellen im Bereich $\pm 0,2$ m. Für 95% der Messstellen ergab die Modellkalibrierung Differenzen von $\pm 0,3$ m.

Ähnliche Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten maximalen Grundwasserhöhen wurden bei der instationären Grundwassersimulation für die Frühjahrsflutung 2015 sowie für die Simulationen Frühjahrsflutung 1998 und 2016 (s. [7]) erzielt. Auch der zeitliche Verlauf der Grundwasserhöhen infolge des instationären Vorgangs der Polderflutung konnte mit dem Modell in allen betrachteten Simulationen gut reproduziert werden. Ebenfalls gut war die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen an den Pegelmessstellen für die Simulation Frühjahrsflutung 2015.

Alle im Rahmen der Modellkalibrierung und -validierung ermittelten Werte der Modellparameter liegen innerhalb der Erwartungsgrenzen und sind somit als realistisch und plausibel anzusehen.

Unsicherheiten der Prognoserechnungen

Der Planzustand unterscheidet sich von den bei der Modellkalibrierung und -validierung untersuchten instationären Grundwassersimulationen hauptsächlich in der Intensität der Polderflutung. Durch die höheren Ausleitungsabflussmengen kommt es im Planzustand zu größeren Überflutungsflächen und zu größeren Wassertiefen in den Poldergebieten. Der instationäre Vorgang der Flutung ist aber vergleichbar mit dem der kleineren jährlichen Frühjahrsflutung. Daher ist davon auszugehen, dass die bei der Modellkalibrierung und -validierung erzielte Genauigkeit der berechneten Grundwasserhöhen von $\pm 0,2$ m bis $\pm 0,3$ m auf die Prognoserechnungen für den Planzustand übertragbar ist.

Hinsichtlich der Sickerwassermengen der Oberflächengewässer im Modellgebiet, lassen sich Angaben zur Genauigkeit der berechneten Abflüsse für den Planzustand nur grob abschätzen. Angesichts der guten und plausiblen Ergebnisse der Wasserbilanzen bei den Simulationen zur Modellkalibrierung, kann in erster Näherung von einer Genauigkeit der berechneten Sickerwassermengen im Planzustand von $\pm 20\%$ bis $\pm 30\%$ ausgegangen werden.

10 Zusammenfassende Bewertung

Durch die Umstellung vom Finite-Differenzen- zum Finite-Elemente-Grundwassermodell wird eine bessere Abbildung der modellrelevanten Gebietsstrukturen ermöglicht. Nach stationärer und instationärer Kalibrierung des FEFLOW-Modells liefert das Modell ähnlich gute Ergebnisse wie das MODFLOW-Modell.

Mit dem neu erstellten FEFLOW-Modell wurde der Planzustand Alternative 3 untersucht. Es ergaben sich teils starke Anstiege des Grundwassers infolge des Einstaus in den Flutpolder. Somit sind großflächige Vernässungen nicht auszuschließen. Ob es tatsächlich zu Vernässungen kommt, hängt im Wesentlichen von der Beschaffenheit und Unversehrtheit der Deckschicht in diesen Bereichen ab.

Um die durch Annahmen bei der Modellerstellung und -kalibrierung entstehenden Unsicherheiten des Modells zu beurteilen, wurde für den Planzustand Alternative 3 eine Sensitivitätsanalyse der Hauptparameter durchgeführt. Diese hat gezeigt, dass durchaus eine hohe Empfindlichkeit der Modellergebnisse gegenüber den Untergrunddurchlässigkeiten sowie gegenüber den Sohdurchlässigkeiten von Gewässern und Gräben besteht. Es ergaben sich für die untersuchten Parameter insgesamt die gleichen Tendenzen wie bei der von Björnsen Beratende Ingenieure durchgeführten Sensitivitätsanalysen für den damaligen Planzustand 4mod (vgl. [3] Abschnitt 2.3). Die damit verbundenen Unsicherheiten sollten bei der Dimensionierung von Schöpfwerken berücksichtigt werden.

Das neu erstellte FEFLOW-Grundwassermodell kann zur Untersuchung von weiteren Maßnahmenvorschlägen verwendet werden.