

Grundwassermodell Untermain

Dokumentation

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Modelleinsatz	6
2	Untersuchungsgebiet	7
2.1	Räumliche Einordnung und Bilanzraum	7
2.2	Klimatische Verhältnisse	9
3	Geologische und hydrogeologische Bestandsaufnahme	11
3.1	Geologie	11
3.2	Hydrogeologische Systematisierung	13
3.2.1	Nomenklatur und hydrogeologische Schematisierung	13
3.2.2	Hydraulische Wirkung der Trennschichten	15
3.3	Grundwasserfließverhältnisse	22
4	Modellaufbau	24
4.1	Abgrenzung und Diskretisierung des Modellraumes	24
4.2	Randbedingungen	25
4.3	Grundwasserentnahmen	26
4.3.1	Brunnen	26
4.3.2	Baggerseen und Gruben	28
4.4	Fließgewässer	29
4.5	Flächenhafte Grundwasserneubildung	31
4.5.1	Vorbemerkungen	31
4.5.2	Modellierung des Bodenwasserhaushalts	32
4.5.3	Abgebildete Prozesse und Eigenschaften	32
4.5.4	Niederschlag und potentielle Verdunstung	33
4.5.5	Böden und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone	35
4.5.6	Landnutzung	36
4.5.7	Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg	36
4.5.8	Tatsächliche Verdunstung von Landflächen	36
4.5.9	Landwirtschaftliche Bewässerung	37
4.5.10	Ergebnisse	38
5	Modellkalibrierung	39
5.1	Allgemeines	39
5.2	Stationäre Modellkalibrierung	39
5.2.1	Variation der Modellparameter	41
5.2.2	Ergebnisse der stationären Modellkalibrierung	41
5.3	Instationäre Modellkalibrierung	42
5.3.1	Aufbau des instationären Eingabedatensatzes	42
5.3.2	Kalibrierte Modellparameter	42
5.3.3	Ergebnisse der instationären Modellkalibrierung	43
5.4	Modellgüte und Sensitivitätsanalyse	44
5.4.1	Modellgüte	44
5.4.2	Sensitivitätsanalyse	45

5.4.3	Ausdehnung der Trennschichten	46
5.5	Wassermengenbilanz	48
5.6	Prognosefähigkeit und Unsicherheiten	49
6	Literatur	51

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Einordnung des Modellgebietes anhand Hydrogeologischer Teilräume (hessisches Gebiet). HLNUG - Geologie Viewer (2021)	8
Abb. 2	Niederschlagssummen DWD-Messstation Mainhausen-Zellhausen	9
Abb. 3	Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration DWD-Klimastation Schaafheim-Schlierbach	10
Abb. 4	Ausschnitt der Geologischen Übersichtskarte Hessen GÜK 300 (HLUG 2007)	12
Abb. 5	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-103 (2. Grundwasserleiter oben)/ -104 (1. Grundwasserleiter)	16
Abb. 6	Grundwasserstandsganglinien der 2-fach-Messstelle ZWO-11-107 (2. Grundwasserleiter oben)/-108 (1. Grundwasserleiter)	17
Abb. 7	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 186 (2. Grundwasserleiter)/ 187 (1. Grundwasserleiter)	18
Abb. 8	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 019 (1. Grundwasserleiter unten)/ 179 (1. Grundwasserleiter oben)	19
Abb. 9	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 124 (1. Grundwasserleiter unten)/ 125 (1. Grundwasserleiter oben)	20
Abb. 10	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-109 (unterhalb des Oberen Tons)/ -110 (oberhalb des Oberen Tons)	21
Abb. 11	Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-121 (unterhalb des Tiefen Zwischenhorizonts)/ -124 (oberhalb des Tiefen Zwischenhorizonts)	22
Abb. 12	Langjährige Grundwasserstandsganglinien im Modellgebiet	23
Abb. 13	Monatsmittelwerte Abfluss Pegel Harreshausen	31
Abb. 14	Prozesse des Bodenwasserhaushaltes	33
Abb. 15	Flächengemittelte jährliche Grundwasserneubildung [mm/a]	38
Abb. 16	Langjährige Grundwasserstandsganglinien zur Definition des stationären Kalibrierzeitpunktes	40
Abb. 17	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen im 1. GWL zum stationären Kalibrierzeitpunkt	44

Abb. 18	Farbliche Differenzierung des geologischen Nachweises und der flächenhaften Ausbreitung im Grundwassermodell des Tiefen Zwischenhorizonts (Stellungnahme HLNUG vom 15. März 2021)	47
---------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Im Modell implementierte Grundwasserförderung aus Brunnen 2013 [Mio. m³/a]	28
Tab. 2	Niederschlags- und Klimastationen zur Regionalisierung von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration (Etp)	35
Tab. 3	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	46
Tab. 4	Wasserbilanzgrößen bei mittleren Verhältnissen für das Jahr 2013	48
Tab. 5	Schwankungsbreiten der Wasserbilanzgrößen im Zeitraum 1987-2018	48

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Übersichtslageplan mit Brunnen	1:50.000
Anlage 2.1	Übersichtslageplan Bohransatzpunkte	1:50.000
Anlage 2.2	Lageplan der hydrogeologischen Schnitte	1:100.000
Anlage 2.3	Hydrogeologischer Schnitt 1 - 1'	
Anlage 2.4	Hydrogeologischer Schnitt 2 - 2'	
Anlage 3	Aquiferbasis	1:100.000
Anlage 4.1	Grundwasserstände August 2008 im Bereich Zellhausen	1:15.000
Anlage 4.2	Lageplan der Messstellen mit dargestellten Druckdifferenzen	1:100.000
Anlage 5	Gleichen 1. Grundwasserleiter Oktober 2013	1:100.000
Anlage 6	Modellrandbedingungen und Finite-Elemente-Netz	1:100.000
Anlage 7.1	Verbreitung der Trennschichten	1:100.000
Anlage 7.2	Ausdehnung der Trennhorizonte, Mächtigkeit und Oberkante Deckschicht	1:100.000
Anlage 7.3	Ausdehnung der Trennhorizonte, Mächtigkeit und Oberkante Oberer Ton	1:100.000
Anlage 7.4	Ausdehnung der Trennhorizonte, Mächtigkeit und Oberkante Trennschicht ZVG	1:100.000
Anlage 7.5	Ausdehnung der Trennhorizonte, Mächtigkeit und Oberkante Unterer Ton	1:100.000
Anlage 7.6	Ausdehnung der Trennhorizonte, Mächtigkeit und Oberkante Tiefer Zwischenhorizont	1:100.000
Anlage 7.7	Modellschnitt West-Ost	o. M.
Anlage 8	Kleinstentnehmer im Modellgebiet	Tabelle
Anlage 9.1	Klima	1:160.000

Anlage 9.2	Boden	1:160.000
Anlage 9.3	Landnutzung	1:160.000
Anlage 9.4	Mittlere Grundwasserneubildung [mm/a]	1:100.000
Anlage 10	Berechnete Grundwassergleichen und Messwerte für Oktober 2013 im oberen 1. Grundwasserleiter	1:100.000
Anlage 11	Kalibrierte k_f -Werte im 1. Grundwasserleiter	1:100.000
Anlage 12.1	Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Ganglinien	Diagramme
Anlage 12.2	Lage der Grundwassermessstellen aus Anlage 11.1	1:100.000
Anlage 13.1	Berechnete Grundwassergleichen und Messwerte für April 2003 im oberen 1. Grundwasserleiter (hohe Grundwasserstände)	1:100.000
Anlage 13.2	Berechnete Grundwassergleichen und Messwerte für November 2018 im oberen 1. Grundwasserleiter (niedrige Grundwasserstände)	1:100.000
Anlage 14	Wasserbilanzgrößen im Modellgebiet unter den Randbedingungen 2013	1:100.000

1 Veranlassung und Modelleinsatz

Das Gebiet des Grundwassermodells Untermain wird wegen der günstigen geohydraulischen Eigenschaften des Lockergesteins intensiv zur öffentlichen Wasserversorgung genutzt. Innerhalb des Modellgebietes liegen als größte Wasserversorger der Region die Gewinnungen des Zweckverbands Wasserversorgung Stadt und Kreis Offenbach (ZWO) sowie des Zweckverbands Gruppenwasserwerk (ZVG) Dieburg. Darüber hinaus hat der Raum eine hervorgehobene Funktion für die lokale und regionale Versorgung (Rhein-Main-Gebiet) mit mineralischen Rohstoffen.

Das Grundwassermodell „Untermain“ wurde konzipiert für die Bearbeitung von qualitativen Fragestellungen der regionalen Grundwasserbewirtschaftung. Es wird zur stationären und instationären Strömungsberechnung eingesetzt.

Das im Grundwassermodell abgebildete Gebiet deckt westlich des Mains den wasserwirtschaftlich relevanten Teil des hessischen östlichen Untermaingebietes und die angrenzenden bayerischen Flächen mit einer Gesamtmodellfläche von ca. 335 km² ab. **Anlage 1** zeigt einen Lageplan des Modellgebiets mit den darin vorhandenen Brunnen.

Die Modelldokumentation folgt der im Jahr 2013 verfassten Modelldokumentation des bestehenden „Grundwassermodell Untermain“ (BGS UMWELT 2013). Im Zuge einer aktuellen Modellüberarbeitung wurde das Modellgebiet erweitert. Neben einer stationären Modellkalibrierung wurde das Modell auch instationär kalibriert.

Die Eingangsdatensätze wurden für Kontinuums-Simulationen ab 1987 erstellt. Die Grunddaten der instationären Eingabedatensätze wie Fördermengen, Pegelstände des Mains, Wasserspiegellagen der Fließgewässer und Grundwasserneubildung werden separat vorgehalten. Dies gibt die Möglichkeit das FE-Netz flexibel an die jeweilige Aufgabenstellung anpassen zu können (z.B. Implementierung neuer Brunnen mit lokaler Netzverfeinerung oder bereichsweise Netzverfeinerung für Transportberechnungen). Zusätzlich ist die Operationalität des Modelleinsatzes sichergestellt. Die hydrogeologische Schematisierung des Grundwassermodells mit den abgeleiteten Parametersätzen wird beim jeweiligen Modelleinsatz grundsätzlich beibehalten. Anpassungen für spezielle Fragestellungen werden gesondert dokumentiert.

2 Untersuchungsgebiet

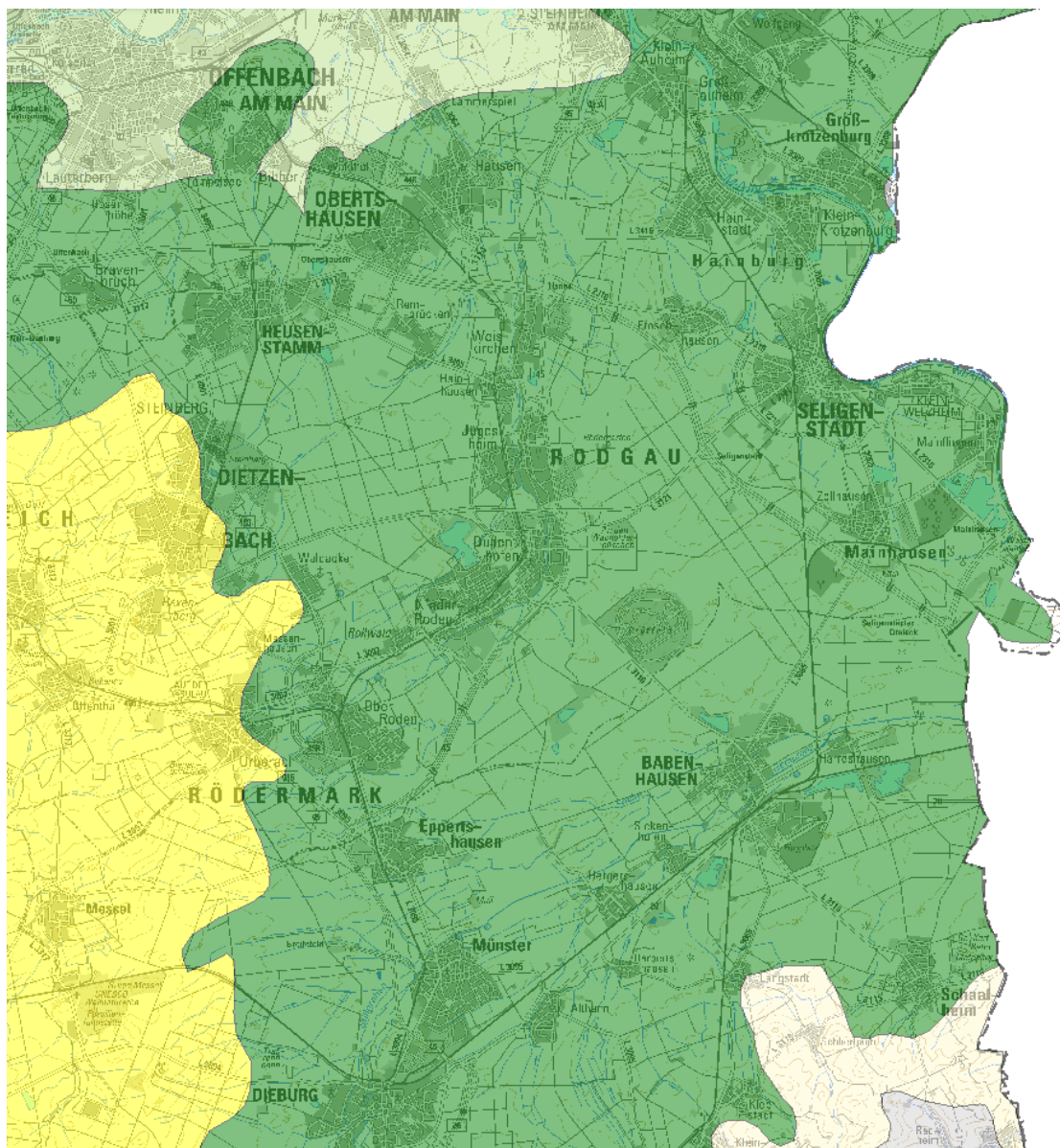
2.1 Räumliche Einordnung und Bilanzraum

Das Modellgebiet befindet sich in der tektonischen Einheit des Hanauer Beckens (östliche Untermainebene), welches im Osten durch den Spessart, im Süden durch den Odenwald und im Westen durch den Sprendlinger Horst (Abgrenzung vom Oberrheingraben) eingegrenzt wird. Es erstreckt sich westlich des Mains über den wasserwirtschaftlich relevanten Teil des hessischen Untermaingebiets mit angrenzenden bayerischen Flächen. Im Südosten wurde das bestehende Modell im Rahmen der Überarbeitung erweitert, um alle Einflussbereiche der Grundwassergewinnungen im Modellgebiet korrekt abbilden zu können. Die Erweiterung umfasst das Gebiet der Mainniederung bis Großwallstadt im Süden.

Das Modell umfasst ausschließlich den Lockergesteinsgrundwasserleiter westlich des Mains. Die Grenze des Modellgebietes bildet im Osten als geohydraulische Systemgrenze der Main. Bei Stockstadt wird die Grundwasserführung im Pleistozän begrenzt durch einen Kristallinaufbruch (Streit & Weinelt 1971), der in diesem Bereich die Modellgrenze bildet.

Das südöstliche Modellgebiet umfasst die sogenannte Schaafheimer Senke und führt zwischen Odenwald und Main bis Großwallstadt. Die Modellgrenze verläuft hier entlang des Übergangs von der Mainniederung zum Buntsandstein im Odenwald. Die westliche Modellgrenze wird durch den Sprendlinger Horst gebildet (Hydrogeologischer Teilraum, Fritsche et al. 2003). Die nördliche Modellgrenze orientiert sich an der hydrogeologischen Teilraumabgrenzung zur Wetterau (Fritsche et al. 2003). Hierbei wurde ein Bereich, in dem die vorhandenen tertiären Festgesteinschichten lokal nur von geringmächtigen Sedimenten überlagert werden, aus dem Modellgebiet ausgeschlossen, da diese wasserwirtschaftlich unbedeutend sind. Abb. 1 zeigt die Abgrenzung der hydrogeologischen Teilräume und die entsprechende Einordnung des hessischen Teils des Modellgebiets in der Hanau-Seligenstädter Senke.

Gersprenz und Rodau bilden die Hauptvorfluter im Bilanzraum.



Hydrogeologische Raumgliederung

Hydrogeologische Teilräume

- 3.2.1 Hanauer-Seligenstädter Senke
- 3.2.2 Wetterau
- 6.2.1 Spessart, Rhönvorland und Buntsandstein des Odenwaldes
- 10.1.2 Kristallin des Odenwaldes
- 10.1.3 Rotliegend des Sprendlinger Horstes

Abb. 1 Einordnung des Modellgebietes anhand Hydrogeologischer Teilräume (hessisches Gebiet). HLNUG - Geologie Viewer (2021)

2.2 Klimatische Verhältnisse

Das Klima im Bereich des Modellgebietes ist dem Klimabezirk Rhein-Main-Gebiet zuzurechnen, welcher dem größeren Klimaraum Südwest-Deutschland untergeordnet ist. Der Klimaraum zeichnet sich durch warme Sommer und milde Winter aus.

Repräsentative Stationen mit langjährigen Messreihen sind die in der Unterrhainebene gelegenen Niederschlagsstationen Heusenstamm (mittl. Jahresniederschlag 1987-1999 711 mm), Rödermark-Ober-Roden (mittl. Jahresniederschlag 1987-2017 710 mm), Babenhausen-Hergershausen (mittl. Jahresniederschlag 1960-1990 665 mm), Schaafheim-Schlierbach (mittl. Jahresniederschlag 1987-2018 630 mm) und Mainhausen -Zellhausen des DWD. Abb. 2 zeigt die Jahresniederschlagssumme der Messstation Mainhausen-Zellhausen für den Zeitraum 1987-2018. Das Mittel für diesen Zeitraum liegt bei 673 mm.

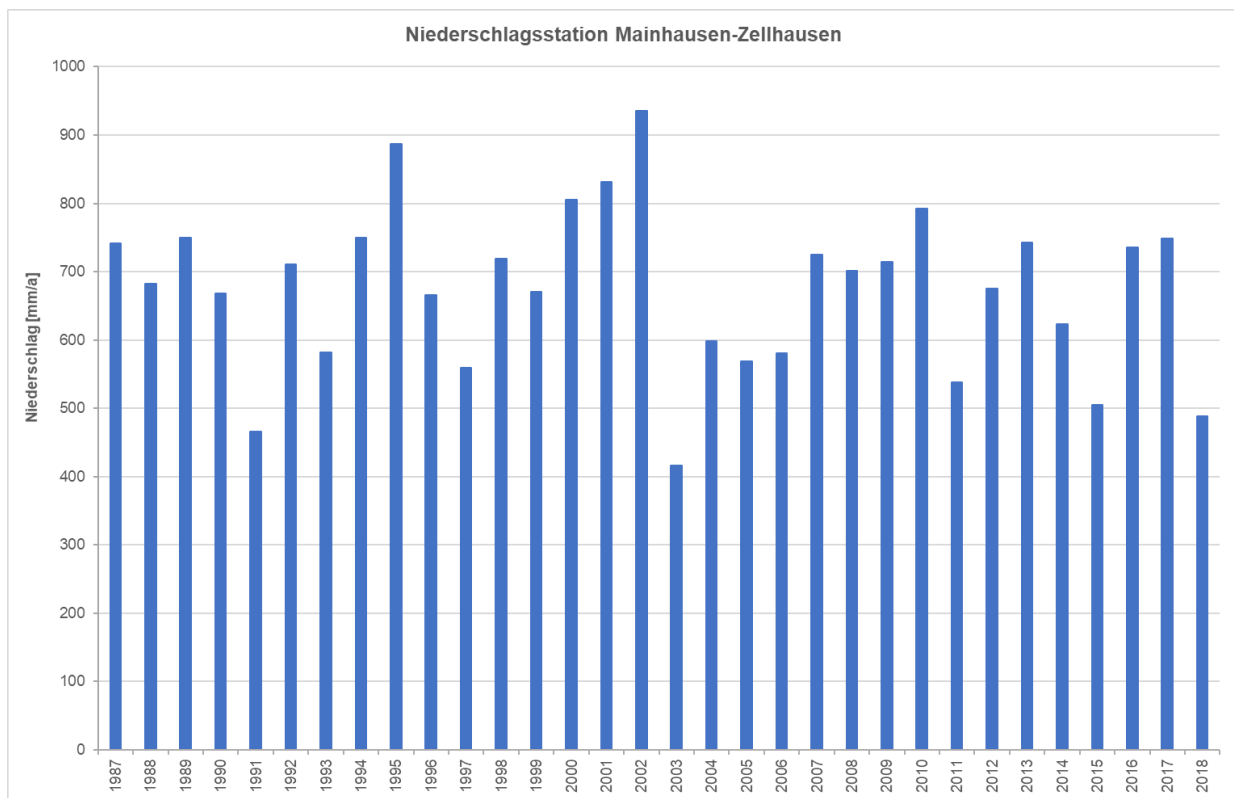


Abb. 2 Niederschlagssummen DWD-Messstation Mainhausen-Zellhausen

Eine repräsentative Messstelle der potentiellen Evapotranspiration ist die Klimastation Schaafheim-Schlierbach mit einer mittleren potentiellen Evapotranspiration für die Jahre 1987-2018 von 676 mm/a (Abb. 3).

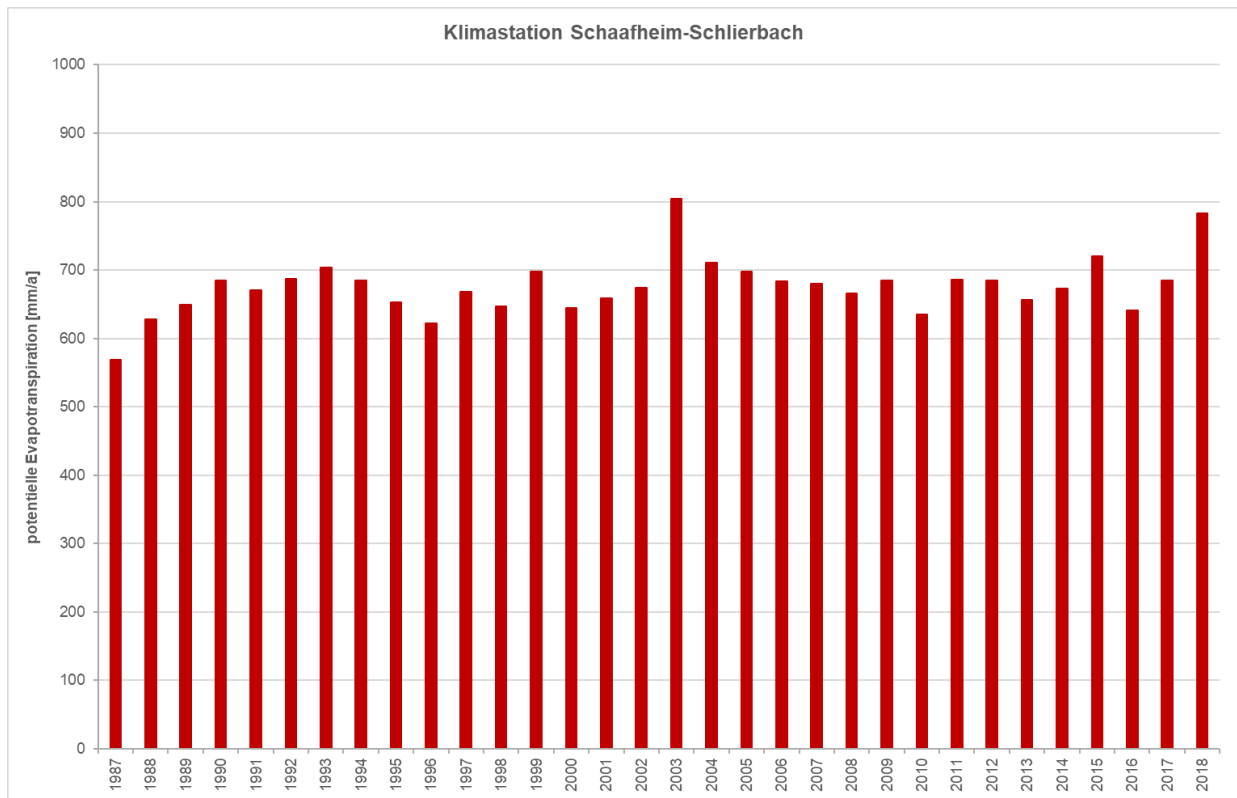


Abb. 3 Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration DWD-Klimastation Schaaheim-Schlierbach

3 Geologische und hydrogeologische Bestandsaufnahme

3.1 Geologie

Geologisch ist die Untermainebene ein känozoisches Senkungsgebiet. Es repräsentiert den nördlichsten Ausläufer des Oberrheingrabens, dessen Öffnung und Einsenkung mit dem Tertiär begann (Budde et al. 2019). Die Hanau-Seligenstädter Senke als östlicher Teil der Untermainebene ist eine Quartärbucht zwischen den Kristallin- und Buntsandsteingebieten von Spessart und Odenwald, die entlang des Mains verläuft (Fritsche et al. 2003).

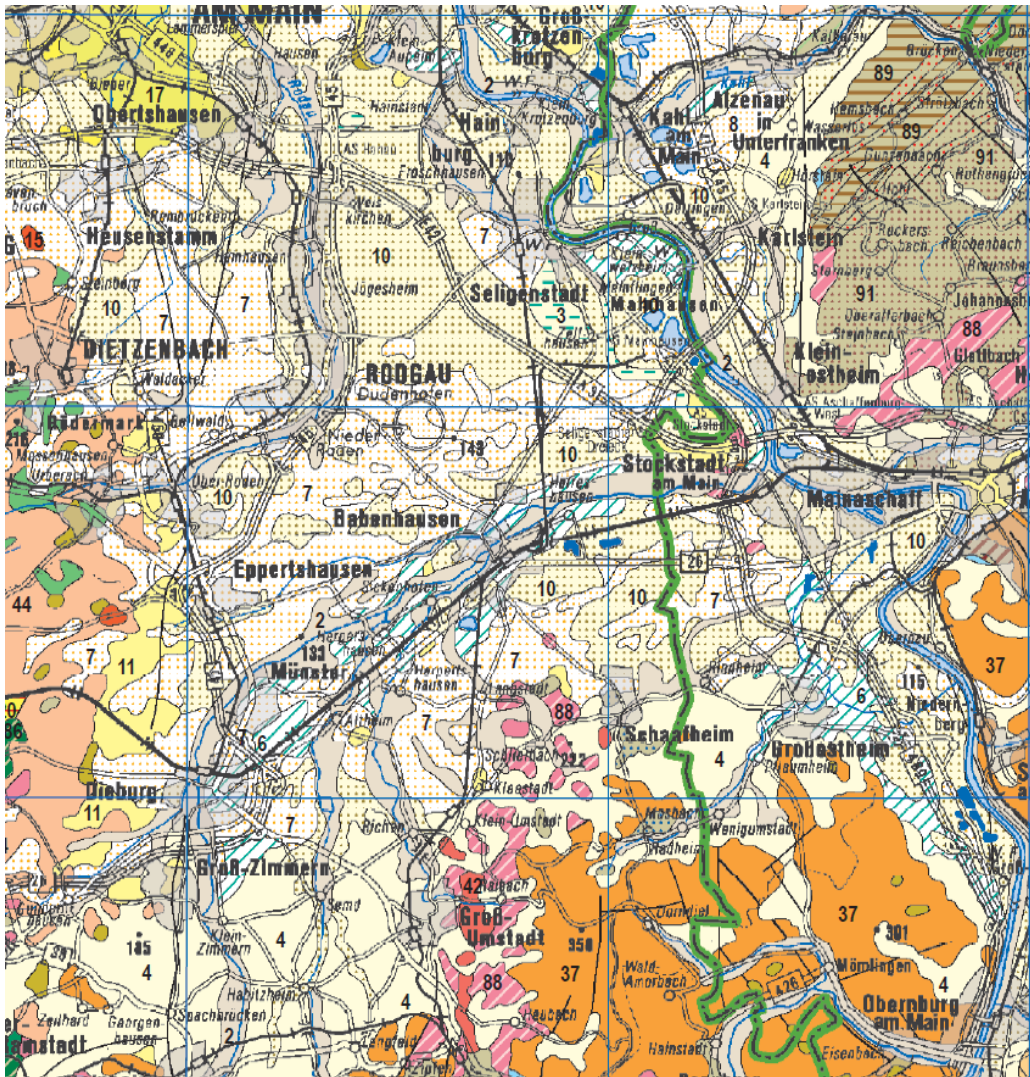
Der Grundwasserleiter besteht aus pliozänen und pleistozänen Lockergesteinen, die im Süden und Osten den Metamorphiten des Vorspessarts bzw. des Böllsteiner Odenwaldes (HLNUG 2017), lokal auch dem Unteren Buntsandstein auflagern.

Nördlich einer Linie Heusenstamm-Weiskirchen-Froschhausen herrschen tonige pliozäne Sedimente vor. Südlich besteht das Pliozän auch aus Feinsanden, die stellenweise fein- bis mittelkie-sige Beimengungen enthalten (Böke 1982).

Die pleistozänen Lockergesteine sind in erster Linie Terrassenablagerungen des Mains, der im Altpleistozän bis tief in die Gersprenzbucht hineinreichte. Als Folge der Verlagerung des Mains nach Osten wurden die Mainablagerungen durch die Odenwaldbäche zum Teil ausgeräumt und umgelagert, so dass eine starke Verzahnung der Main- und Odenwaldbachablagerungen eingetreten ist. Eine Unterscheidung der pleistozänen und pliozänen Sedimente ist nicht immer eindeutig. In der Regel ist das Pliozän feinkörniger ausgebildet. Für die Grundwasserhydraulik ist die Verbreitung von feinkörnigen Trennschichten entscheidend, die den pleistozänen/pliozänen Grundwasserleiter in einzelne Stockwerke untergliedern können.

Die Sedimentation der Hanau-Seligenstädter Senke begann im Pliozän mit der fluviatilen Verfüllung (Lang 2007). Die Untersuchungen von Lang zeigen, dass in der Hanau-Seligenstädter Senke die Sedimente in einen pliozänen und einen unter- bis mittelpleistozänen Abnahme-Anstiegs-Zyklus der A/S-Rate (A: für die Sedimentation verfügbarer Akkommodationsraum, S: Sedimentzufuhr) sowie eine seit dem Mittelpleistozän andauernde A/S-Abnahme gliederbar sind. Eine Abnahme der A/S-Rate führt zu einer relativen Anreicherung grobkörniger Flussbett-Ablagerungen, während ein Anwachsen der A/S-Rate ein höheres Erhaltungspotenzial feinkörniger Sedimente der Überflutungsebenen zur Folge hat. In Sedimentabfolgen sind Abnahme-Anstiegs-Zyklen der A/S-Rate deshalb durch kontinuierliche Übergänge von Sanden und Kiesen an der Basis zu überwiegend tonig-schluffigen Sedimenten in höheren Profilabschnitten dokumentiert (Lang 2007).

Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt der Geologischen Übersichtskarte Hessen, der das Modellgebiet abdeckt.



1	Lehm	Altwassersediment	Holozän
2	Lehm, Sand, Kies	Auensediment, ungliedert	
3	Torf	Holozänes organisches Sediment, ungliedert	
4	Ton, Schluff, oft mit Steinen, Grus und Sand	Fließerde, ungliedert	Pleistozän
5	Phonolitische Aschenablagerungen	Laacher See Tephra	
6	Ton, Lehm	Hochflutlehm	
7 8	Sand	Flugsand, ungliedert, [8] Dünen	
9	Lehm, Sand, Gesteinsblöcke	Geschiebelehm	
10	Kies, Sand	Terrasse, ungliedert	

Abb. 4 Ausschnitt der Geologischen Übersichtskarte Hessen GÜK 300 (HLUG 2007)

3.2 Hydrogeologische Systematisierung

3.2.1 Nomenklatur und hydrogeologische Schematisierung

Für die Grundwasserströmung in Regionalmodellen zur Grundwasserbewirtschaftung sind Trennschichten, die zur Stockwerksgliederung führen, relevant. Datengrundlage für die Ableitung der hydrogeologischen Strukturen bildeten in erster Linie vorhandene Unterlagen über Brunnen- und Messstellenbohrungen der Wasserversorgungsunternehmen (Bohrprofile, Ausbauzeichnungen und Grundwasserstände, vereinzelt Pumpversuche). Zur Vervollständigung erfolgte eine Auswertung der Bohrdaten aus den Erläuterungen zu den geologischen Karten (5919 Seligenstadt, 6019 Babenhausen, 6020 Aschaffenburg) sowie eine Auswertung von Bohrprofilen und Schichtenverzeichnissen des HLNUG. **Anlage 2.1** zeigt die Lage der vorliegenden ausgewerteten Bohrprofile.

In mehreren Bearbeitungsschritten wurden die punktuellen Informationen der Bohrprofile zu Grundwasserleitern und Trennflächen korreliert. Hierbei wurden vorhandene Informationen zu Grundwasserständen ausgewertet, um zu einer Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit der in den vorangegangenen Bearbeitungsschritten abgegrenzten potentiell hydraulisch wirksamen Trennschichten zu gelangen.

Für die Modellkalibrierung sowie die Grundwassermodellrechnungen sind ausschließlich flächenhaft verbreitete Schichten relevant, die eine hydraulische Trennwirkung aufweisen. Im nachfolgenden Bearbeitungsschritt wurden dann die Informationen zu Grundwasserständen ausgewertet, um zu einer Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit der im ersten Bearbeitungsschritt gefundenen potentiell hydraulisch wirksamen Trennflächen zu gelangen. Die hydraulische Trennwirkung wird vor allem anhand von Grundwassermessstellen, die nur in einem Stockwerk verfiltert sind (i.d.R. Mehrfachmessstellen) nachgewiesen. Die beobachteten Grundwasserstände liefern belastbare Informationen über Druckunterschiede zwischen den einzelnen Stockwerken und erlauben die Ableitung der repräsentativen Parameter zur Beschreibung der Durchlässigkeitseigenschaften von geohydraulisch wirksamen Trennschichten und deren hydraulisch plausible räumliche Abgrenzung im Zuge der Modellkalibrierung. Hierbei erfordern ausgeprägte Druckdifferenzen flächenhaft ausgebildete Trennschichten.

Es ist bei der Ableitung der Trennschichtmächtigkeiten für das Grundwassermodell zu beachten, dass diese nicht zwingend der Dicke einer einzelnen Ton-/Schluffschicht einer Bohrung entsprechen, sondern sich auch der Gesamtmächtigkeit einer Wechsellagerung mit überwiegend bindigen Substraten ergeben kann. Diese im Modell implementierten Trennschichten sind nicht zwangsläufig in der gesamten Fläche nachgewiesen, da viele Bohrungen nicht die entsprechenden Tiefen aufweisen. Trotz dieser Unsicherheit ist jedoch anhand der punktuell gemessenen Druckunterschiede eine plausible Annahme der flächenhaften Ausdehnung der Trennschichten zur realitätsnahen Beschreibung der Hydraulik im Modellgebiet zielführend und möglich. Schwächungen oder Fehlstellen der Trennschichten werden entsprechend bei Messungen, in denen keine Druckunterschiede zwischen 2 Grundwasserleitern/-stockwerken bestehen, berücksichtigt. Es ist generell zu beachten, dass Trennschichten auch auf vergleichbarem Höhenniveau

stratigraphisch unabhängig sein können und lediglich deren hydraulisch plausible räumliche Ausdehnung berücksichtigt wurde.

Anhand der beschriebenen Datengrundlage wurde der Untergrund für die detaillierte Implementierung in das dreidimensionale Grundwassermodell in hydrostratigraphische Einheiten untergliedert und hydrogeologisch systematisiert.

Im Modellgebiet sind insgesamt fünf flächenhaft hydraulisch wirksame Trennschichten zu unterscheiden. Auf der oberflächennahen bindigen **Deckschicht** sind teilweise lokal schwebende Grundwasserleiter von geringer Mächtigkeit ausgebildet, die mit dem 1. Grundwasserleiter nicht in Verbindung stehen. Im 1. Grundwasserleiter ist bei der Gewinnung Zellhausen bereichsweise ein **Oberer Ton** vorhanden, auf dem sich ebenfalls ein schwebender Grundwasserleiter befindet. Der 1. Grundwasserleiter ist im südwestlichen Modellgebiet durch eine stockwerkstrennende Tonschicht (**Trennschicht ZVG**) in den 1. Grundwasserleiter oben und 1. Grundwasserleiter unten unterteilt.

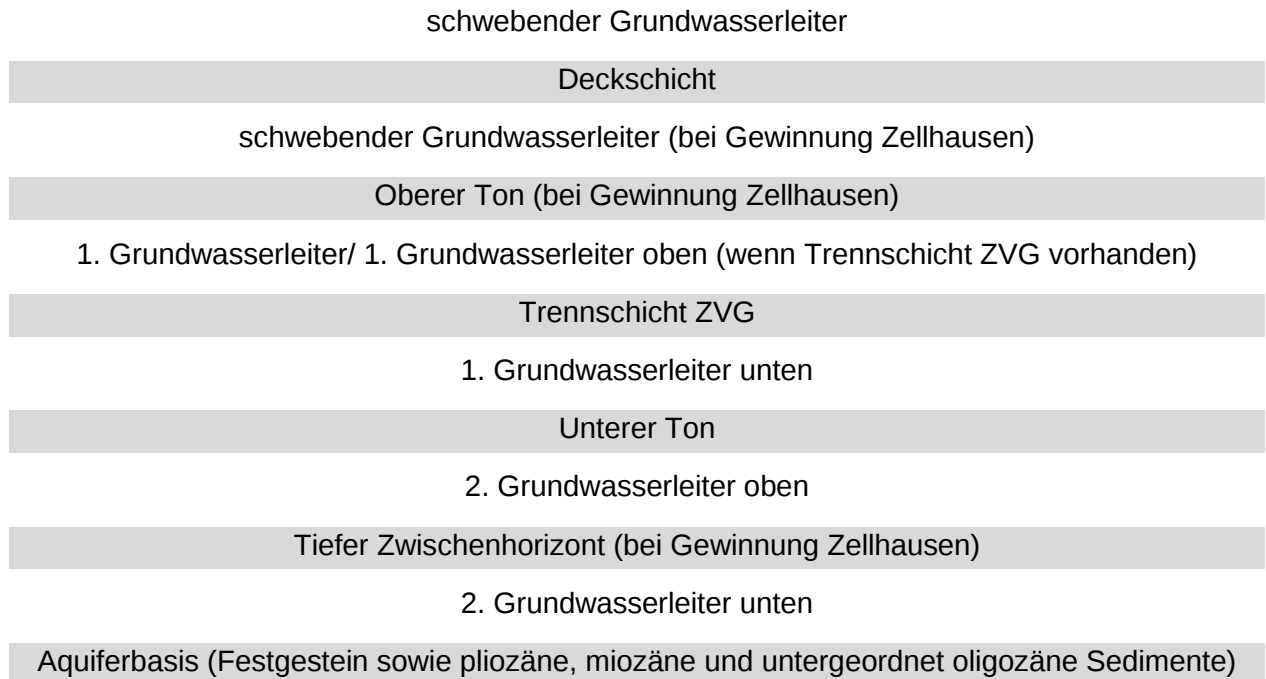
Der **Untere Ton** stellt in weiten Teilen des Modellgebiets die Basis des 1. Grundwasserleiters dar. Auch wenn der Untere Ton anhand von Bohrprofilen hauptsächlich aufgrund unzureichender Bohrtiefen nicht flächendeckend nachgewiesen werden konnte, wird aufgrund vorhandener Messwerte der Grundwasserstände und der Grundwasserqualität an Mehrfachmessstellen von einer flächenhaften Verbreitung des Unteren Tons ausgegangen (Kap. 3.2.2). Der 2. Grundwasserleiter liegt unterhalb des Unteren Tons und wird bereichsweise bei der Gewinnung Zellhausen durch einen **Tiefen Zwischenhorizont** in einen 2. Grundwasserleiter oben und einen 2. Grundwasserleiter unten unterteilt.

In der Schaafheimer Senke ist der Grundwasserleiter nicht in Stockwerke gegliedert.

Anlage 2.3 und **Anlage 2.4** zeigen geologische Schnitte durch das Modellgebiet mit der entsprechend nachgewiesenen Verbreitung der Trennschichten. Die Lage der Schnitte ist in **Anlage 2.2** verzeichnet.

Die Basis des pliozänen Grundwasserleiters wird durch Festgestein (Gneis) gebildet. Anhand **Anlage 3** ist zu erkennen, dass die Basis im zentralen Modellbereich im Minimum bei ca. 20 müNN liegt und insbesondere zum Stockstädter Kristallinaufstoß im Osten, zum Spremlinger Horst im Westen sowie zum kristallinen Odenwald im Süden auf ca. 110 müNN hin ansteigt. Im zentralen Modellbereich, in dem auch der 2. Grundwasserleiter vorhanden ist, wurde über weite Bereiche die Basis des Pliozäns (Lang, 2007) als Modellbasis angesetzt, während in den übrigen Modellbereichen tertiäre Tone und Schluffe oder das Kristallin (im Bereich des Brunnens XVIII des ZVG Dieburg in der Schaafheimer Senke) die Basis bilden.

Daraus ergibt sich folgende hydrogeologische Schematisierung:



3.2.2 Hydraulische Wirkung der Trennschichten

Anlage 4.1 zeigt exemplarisch die zur Bestimmung der Trennschichten relevante Auswertung der Grundwasserstände im Bereich Zellhausener Wald, in dem bis zu 5 Grundwasserstockwerke unterschieden werden können, für den Zeitpunkt August 2008. **Anlage 4.2** zeigt die Lage der Messstellen, deren Ganglinien nachfolgend dargestellt sind. In der Auswertung der Grundwasserstände im Bereich Zellhausener Wald sind deutlich die höheren Grundwasserstände im schwebenden Grundwasserleiter oberhalb der Deckschicht mit Druckdifferenzen von bis zu über 10 m zum 1. Grundwasserleiter zu erkennen. Das Grundwasser im 1. Grundwasserleiter weist Druckdifferenzen zum schwebenden Grundwasserleiter oberhalb des Oberen Tons von ca. 2 m auf (ZWO-11-109/-110). Zwischen dem durch den Unteren Ton getrennten 1. und 2. Grundwasserleiter betragen die Druckdifferenzen bis zu über 1 m (ZWO-11-107/108, HIM-00-0113/-0114).

Zur Überprüfung der hydraulischen Trennwirkung der Tonschichten wurden, wenn vorhanden, zusätzlich zu den Messungen der Mehrfachmessstellen Ergebnisse von Pumpversuchen herangezogen. Sowohl die meisten Brunnen des ZWO als auch die Brunnen des ZVG Dieburg sind im 1. Grundwasserleiter verfiltert. Der Brunnen VIII tief des ZVG wurde im Jahr 2020 im 2. Grundwasserleiter eingerichtet. Unterhalb des Oberen Tons sind die tiefen Filterstrecken einzelner Brunnen der Gewinnung Lange Schneise sowie die Filterstrecken der Brunnen der Gewinnungen Seligenstadt und Zellhausener Wald angeordnet.

An den Brunnen Zellhausener Wald wurden im Herbst 1995 Pumpversuche durchgeführt (BGS UMWELT 2008, Bieske und Partner 1996). Während des Pumpversuchs an dem im 2. Grund-

wasserleiter unten verfilterten Brunnen 11.51 zeigte sich trotz einer Absenkung von bis zu 21,5 m im Brunnen keine Reaktion an den im darüber liegenden 2. Grundwasserleiter oben verfilterten Messstellen. Der 2. Grundwasserleiter unten blieb während der gesamten Dauer des Pumpversuchs gespannt. Im Bereich der Brunnen Zellhausener Wald ist demnach eine deutliche Trennwirkung zwischen dem 2. Grundwasserleiter oben und dem 2. Grundwasserleiter unten belegt. Bei den Pumpversuchen an den im 2. Grundwasserleiter oben verfilterten Brunnen 11.50, 11.52 und 11.53 zeigte sich an den im 1. Grundwasserleiter verfilterten Grundwassermessstellen im Nahbereich der Brunnen keine signifikante Reaktion, während eine Absenkung der im 2. Grundwasserleiter oben verfilterten Messstellen deutlich zu messen war. Daher kann hier, auch wenn der Untere Ton im Bohrprofil des zwischen den Brunnen 11.50 und 11.52 gelegenen Brunnens 11.51 in den vorliegenden Unterlagen nicht nachgewiesen wurde, von einer hydraulischen Trennwirkung zwischen dem 1. und 2. Grundwasserleiter ausgegangen werden.

Exemplarisch zeigen Abb. 5 und Abb. 6 Grundwasserstandsganglinien von Mehrfachmessstellen im Bereich Zellhausen. Wie bereits anhand der Stichtagsmessung für August 2008 (Anlage 4) gesehen, zeigt der Untere Ton in diesem Bereich eine starke Trennwirkung mit höheren Grundwasserständen im 2. Grundwasserleiter (ZWO-11-103 und ZWO-11-107) als im 1. Grundwasserleiter (ZWO-11-104 und ZWO-11-108). Insbesondere an der Messstelle ZWO-11-107 ist der Einfluss der Förderung der im 2. Grundwasserleiter verfilterten Brunnen Zellhausen ab 2016 deutlich zu erkennen, während dies an der im 1. Grundwasserleiter verfilterten Messstelle ZWO-11-108 nicht der Fall ist.

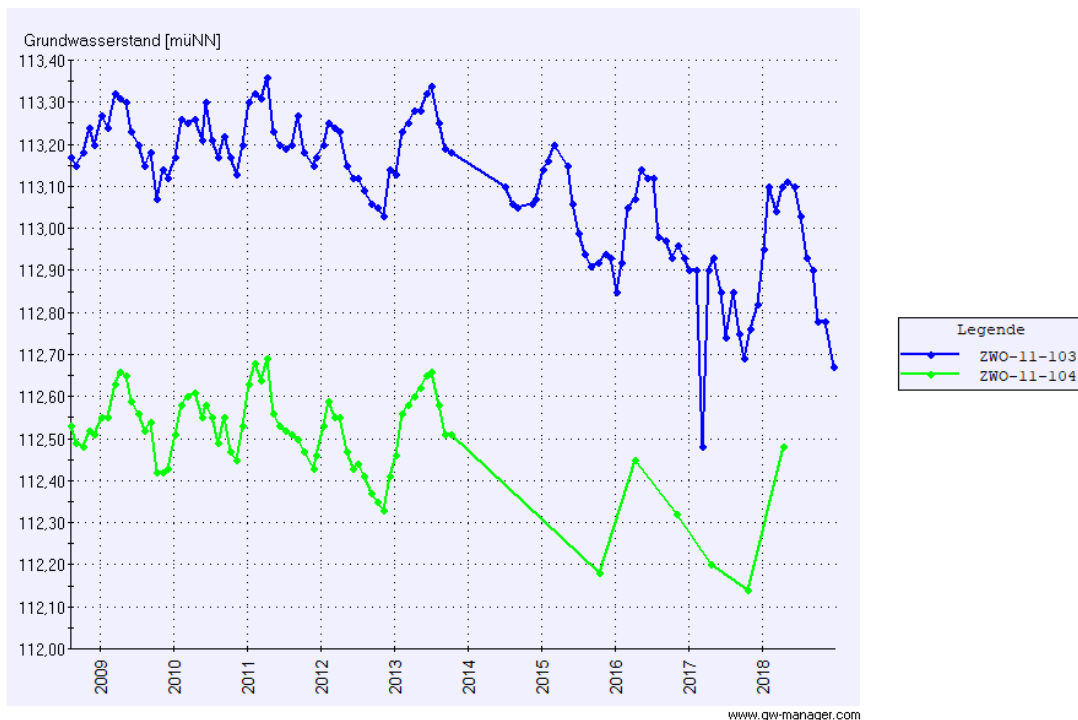


Abb. 5 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-103 (2. Grundwasserleiter oben)/ -104 (1. Grundwasserleiter)

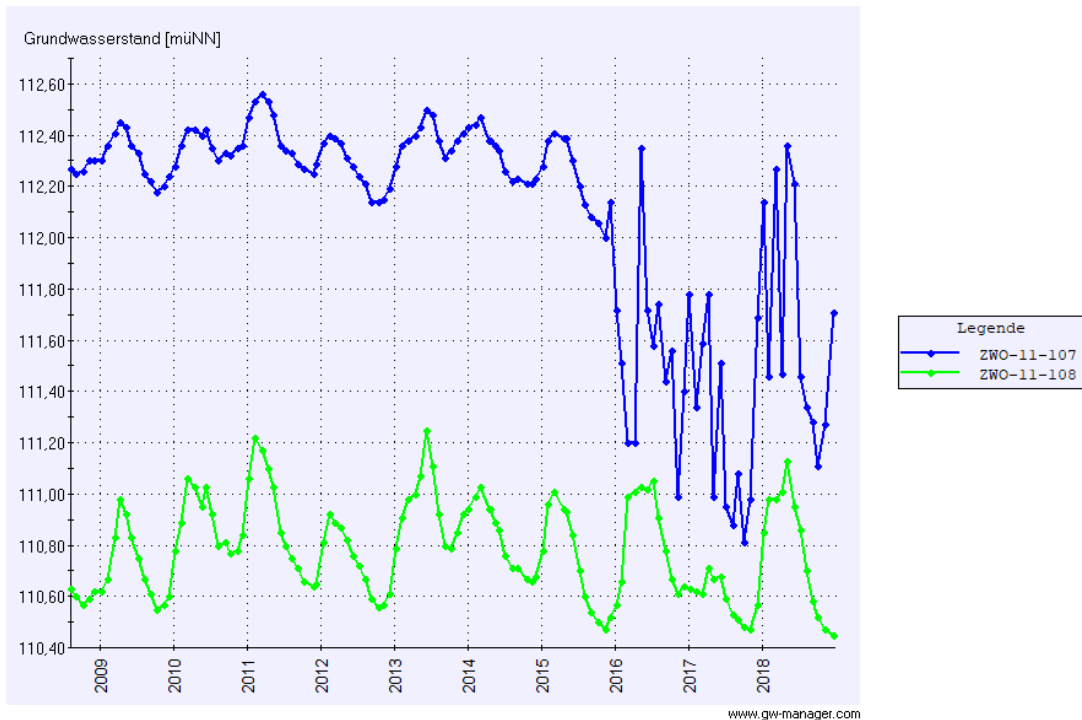


Abb. 6 Grundwasserstandsganglinien der 2-fach-Messstelle ZWO-11-107 (2. Grundwasserleiter oben)/-108 (1. Grundwasserleiter)

Der Untere Ton stößt im Norden und Nordosten des Modellgebiets bis unmittelbar an die aufsteigende Aquiferbasis heran und wird durch diese begrenzt. Der 2. Grundwasserleiter ist somit, entsprechend der Verbreitung des Unteren Tons, zwar sehr weiträumig, jedoch nicht vollständig flächendeckend im Modell- bzw. Untersuchungsgebiet vorhanden. In der Schaafheimer Senke ist der Grundwasserleiter nicht in Stockwerke gegliedert.

Auch nördlich der Brunnen VI-X des ZVG Dieburg (nordwestlich von Babenhausen) ist die Trennwirkung des Unteren Tons deutlich ausgeprägt mit höheren Grundwasserständen im 1. Grundwasserleiter (ZVG-He-50 187) und einem Druckunterschied von ca. 60 cm zwischen dem 1. und 2. Grundwasserleiter (Abb. 7).

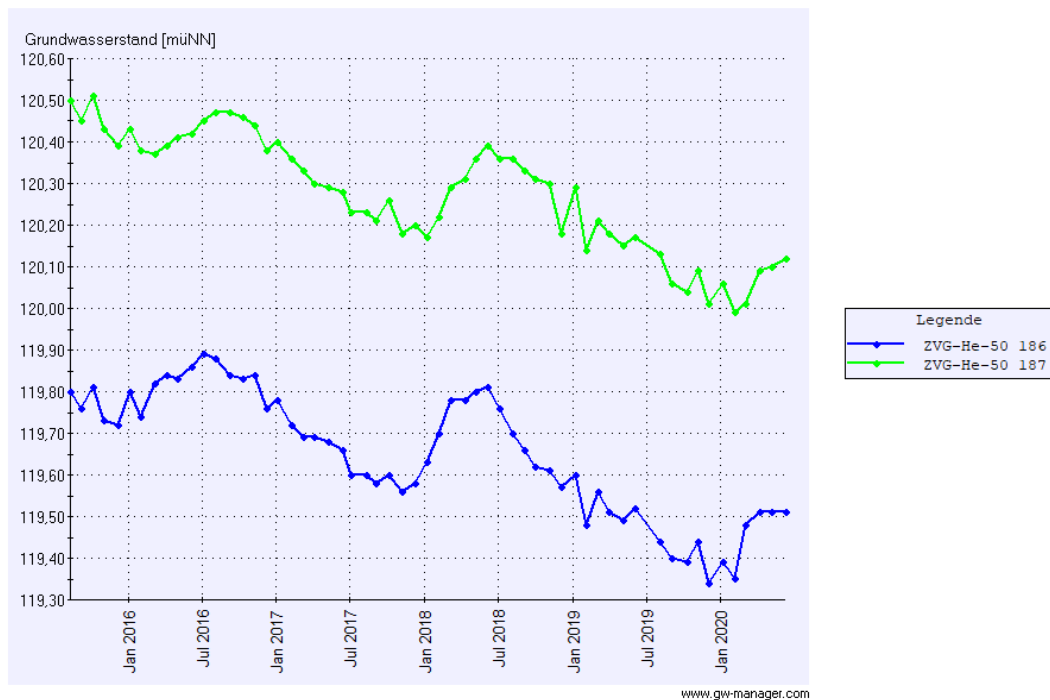


Abb. 7 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 186 (2. Grundwasserleiter)/ 187 (1. Grundwasserleiter)

Die hydrogeologischen Betrachtungen haben weiterhin ergeben, dass im südwestlichen Modellgebiet, der Dieburger Bucht, eine stockwerkstrennende Tonschicht ausgebildet ist, die den 1. Grundwasserleiter in einen 1. Grundwasserleiter oben und einen 1. Grundwasserleiter unten unterteilt. Diese Trennschicht („Trennschicht ZVG“) keilt nördlich bzw. nordöstlich der Brunnengalerie des ZVG Dieburg aus. Bereichsweise liegen die Druckunterschiede zwischen dem 1. Grundwasserleiter oben und dem 1. Grundwasserleiter unten bei über 1 m (Abb. 8).

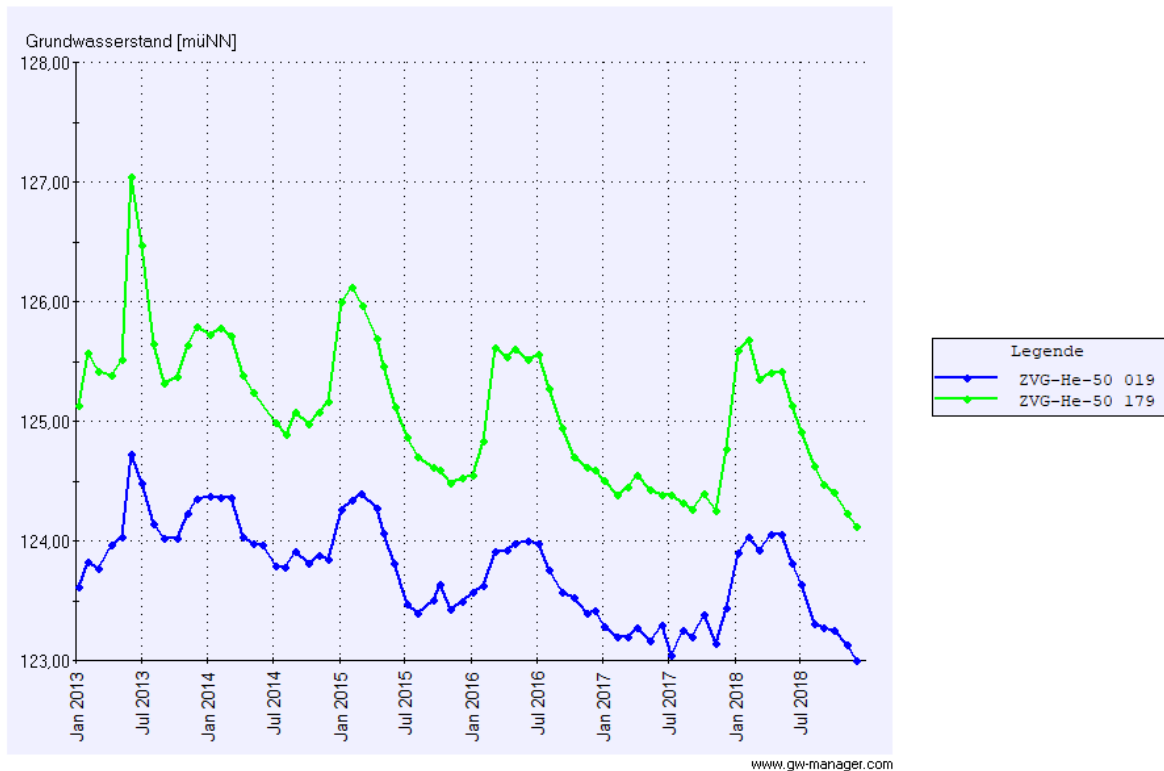


Abb. 8 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 019 (1. Grundwasserleiter unten)/ 179 (1. Grundwasserleiter oben)

Da bei einigen Brunnen des ZVG die Filterstrecken sowohl oberhalb als auch unterhalb der Trennschicht angeordnet wurden, sind die Druckunterschiede insbesondere in den Einflussbereichen der Förderbrunnen oftmals weniger ausgeprägt. Zusatzinformationen liefern hier insbesondere Qualitätsinformationen (Nitrat im oberen Stockwerk sehr viel höher als im unteren Stockwerk). Abb. 9 zeigt exemplarisch eine Doppelmessstelle südlich der Brunnen VI-X des ZVG Dieburg. Die Trennschicht zeigt eine hydraulische Trennwirkung zwischen 1. Grundwasserleiter oben (ZVG-He-50 125) und 1. Grundwasserleiter unten (ZVG-He-50 124) mit einem Druckunterschied von bis zu 20 cm.

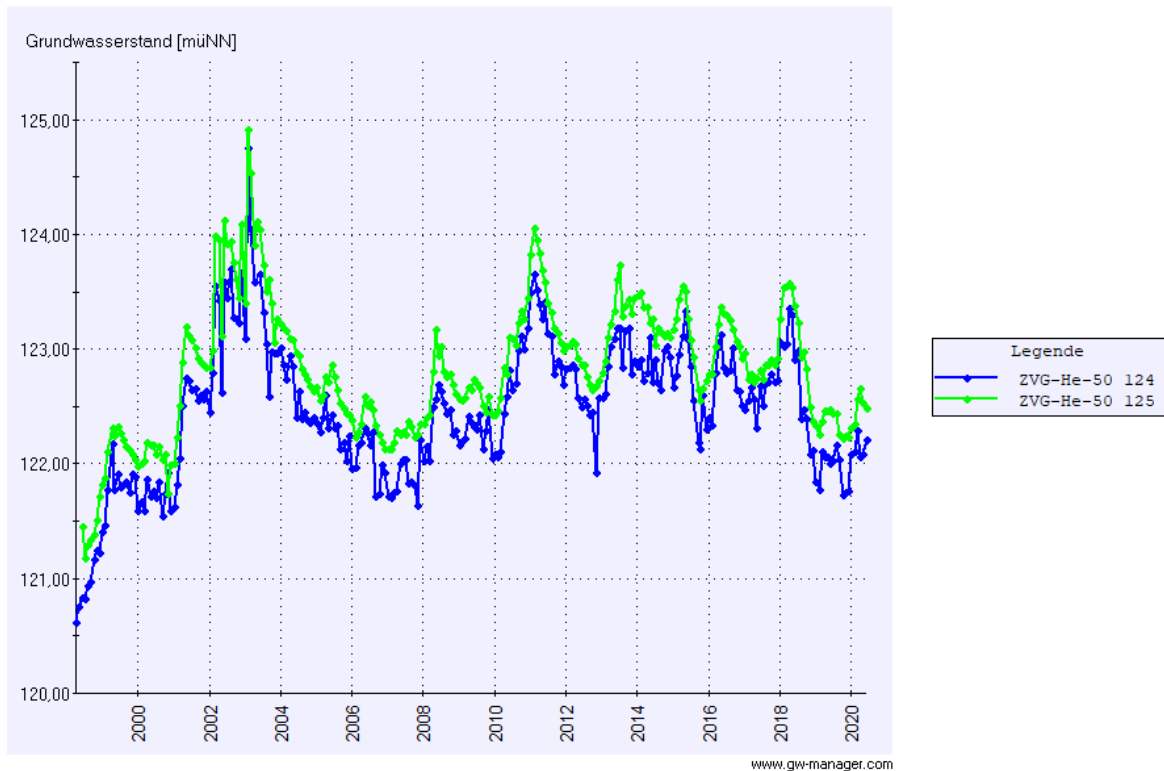


Abb. 9 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZVG-He-50 124 (1. Grundwasserleiter unten)/ 125 (1. Grundwasserleiter oben)

Die Auswertung zahlreicher Bohrprofile zeigt die Verbreitung von flächenhaft ausgebildeten Deckschichten. Aufgrund der Höhenlage der bindigen Deckschichten oberhalb des 1. Grundwasserleiters können diese in der hydrogeologischen Schematisierung zusammengefasst werden, um deren geohydraulische Wirkung bei Fragestellungen der regionalen Grundwasserbewirtschaftung zu erfassen. Auf den oberflächennahen bindigen Deckschichten sind teilweise schwebende Grundwasserleiter von geringer Mächtigkeit ausgebildet, die mit dem 1. Grundwasserleiter nicht in Verbindung stehen. Im Bereich der Brunnen I – VIII des ZVG Dieburg ist die oberflächennahe bindige Deckschicht mit bis zu 10 m Mächtigkeit ausgebildet. Südöstlich der Gersprenz (ab Brunnen IX) keilt diese Deckschicht aus, so dass hier eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen Vorfluter und dem 1. Grundwasserleiter möglich ist. Nach Norden keilt die Deckschicht im Bereich Nieder-Roden aus, wodurch ebenfalls Wechselwirkungen zwischen der Rodau und dem 1. Grundwasserleiter möglich sind. Westlich von Nieder-Roden bei Rollwald ist die Interaktion zwischen der Rodau und dem 1. Grundwasserleiter aufgrund der oberflächennahen, bindigen Deckschicht dagegen stark eingeschränkt. Deckschichten mit größerer flächenhafter Ausdehnung stehen ebenfalls im Bereich der Gewinnungen Lange Schneise Nord, Seligenstadt, Jügesheim und Martinsee an.

Für den Oberen Ton im Bereich Zellhausen, der einen zusätzlichen schwebenden Grundwasserleiter vom 1. Grundwasserleiter trennt, ist anhand der Doppelmessstelle ZWO-11-109 (unterhalb

des Oberen Tons) und ZWO-11-110 (oberhalb des Oberen Tons) ebenfalls eine deutliche Trennwirkung mit Druckunterschieden von mindestens 2 m nachgewiesen (Abb. 10).

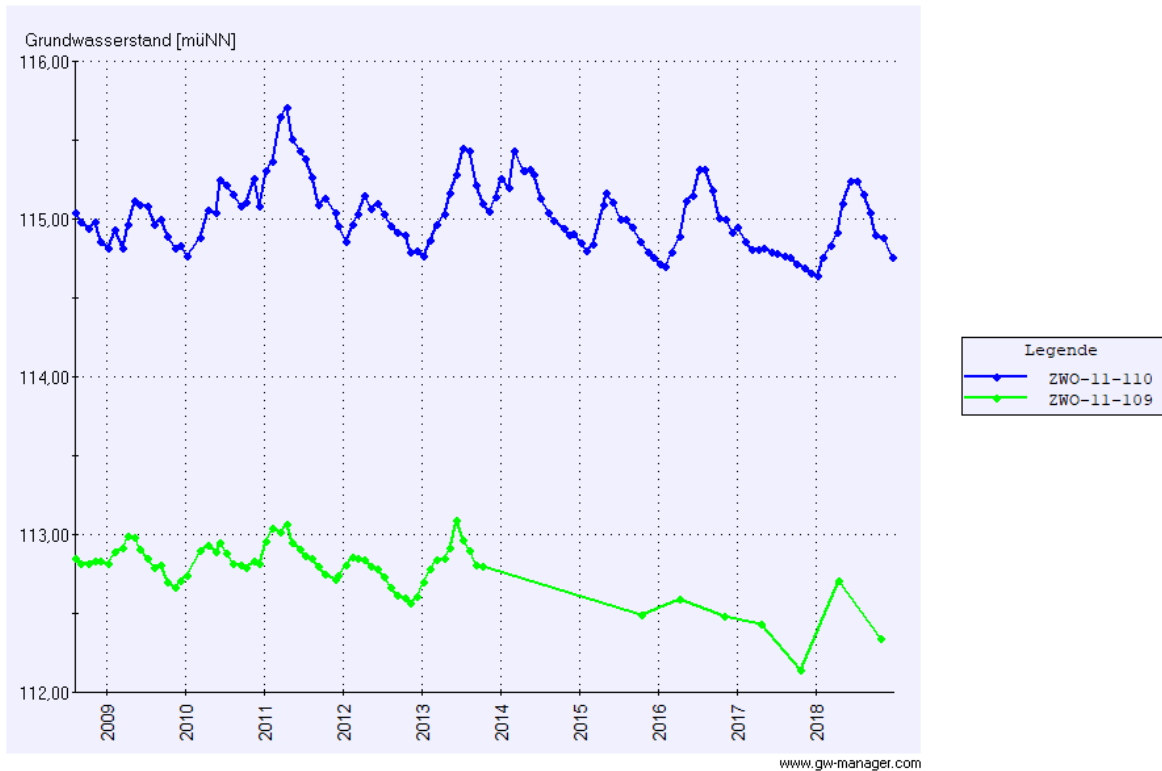


Abb. 10 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-109 (unterhalb des Oberen Tons)/ -110 (oberhalb des Oberen Tons)

Da für die Verbreitung des Tiefen Zwischenhorizonts im Bereich Zellhausen nur wenige Daten vorlagen, wurde diese im Zuge der Erkundung zu den Brunnen Zellhausener Wald nach Süden mittels geoelektrischer Untersuchungen der GGU (Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH Karlsruhe) erkundet (GGU 2008). Die Trennwirkung des Tiefen Zwischenhorizonts ist an den bei Brunnen 11.51 gelegenen Messstellen ZWO-11-121 (unterhalb des Tiefen Zwischenhorizonts) und ZWO-11-124 (oberhalb des Tiefen Zwischenhorizonts) mit einem Druckunterschied von ca. 1,50 m deutlich zu sehen (Abb. 11).

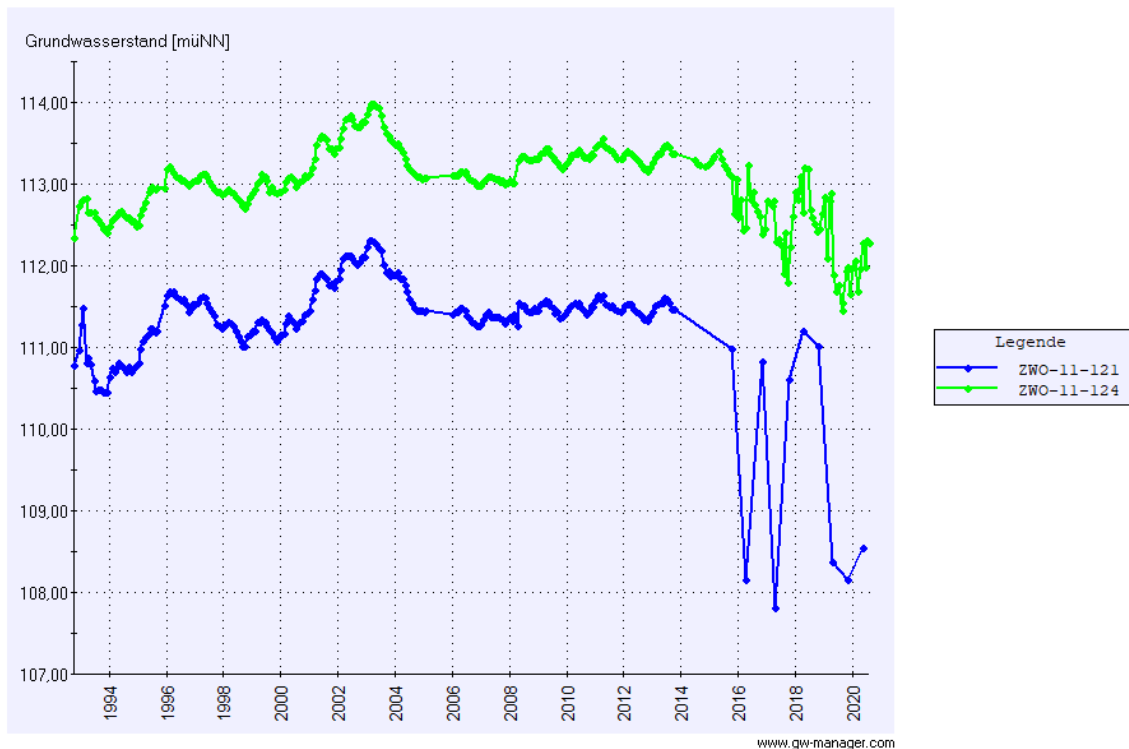


Abb. 11 Grundwasserstandsganglinien der Doppelmessstelle ZWO-11-121 (unterhalb des Tiefen Zwischenhorizonts)/ -124 (oberhalb des Tiefen Zwischenhorizonts)

3.3 Grundwasserfließverhältnisse

Durch die Intensivierung der Grundwasserförderung sind die Grundwasserstände im Modellgebiet in den 1970er Jahren deutlich abgesunken.

Die Tiefststände des Grundwassers im Kalibrierzeitraum (1987-2018) werden in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes Anfang der 1990er Jahre erreicht. In der zweiten Hälfte der 1990er Jahre werden für das förderbedingte neue Niveau mittlere Grundwasserstände beobachtet. Im Jahr 2000 setzt eine Folge von Nassjahren ein, die zu einem signifikanten Grundwasseranstieg führt, der in 2003 seinen Höhepunkt findet. Die Grundwasserhochstände in 2003 sind die höchsten Grundwasserstände, die in den vergangenen 30 Jahren gemessen wurden. Die Winterniederschläge in 2003 und in 2004 waren gering, so dass die Grundwasserstände mangels Grundwasserneubildung nach dem Überschreiten des Höchststandes in 2003 bis zum Ende des Jahres 2004 rückläufig waren. Bis 2018 bleiben die Grundwasserstände auf niedrigem, teilweise sinkendem Niveau. Abb. 12 zeigt hierzu exemplarisch Grundwasserstandsganglinien nördlich von Babenhausen (LHE-00-528020), in der Schaafheimer Senke (LHE-00-528024) und westlich von Jügesheim (LHE-00-508074).

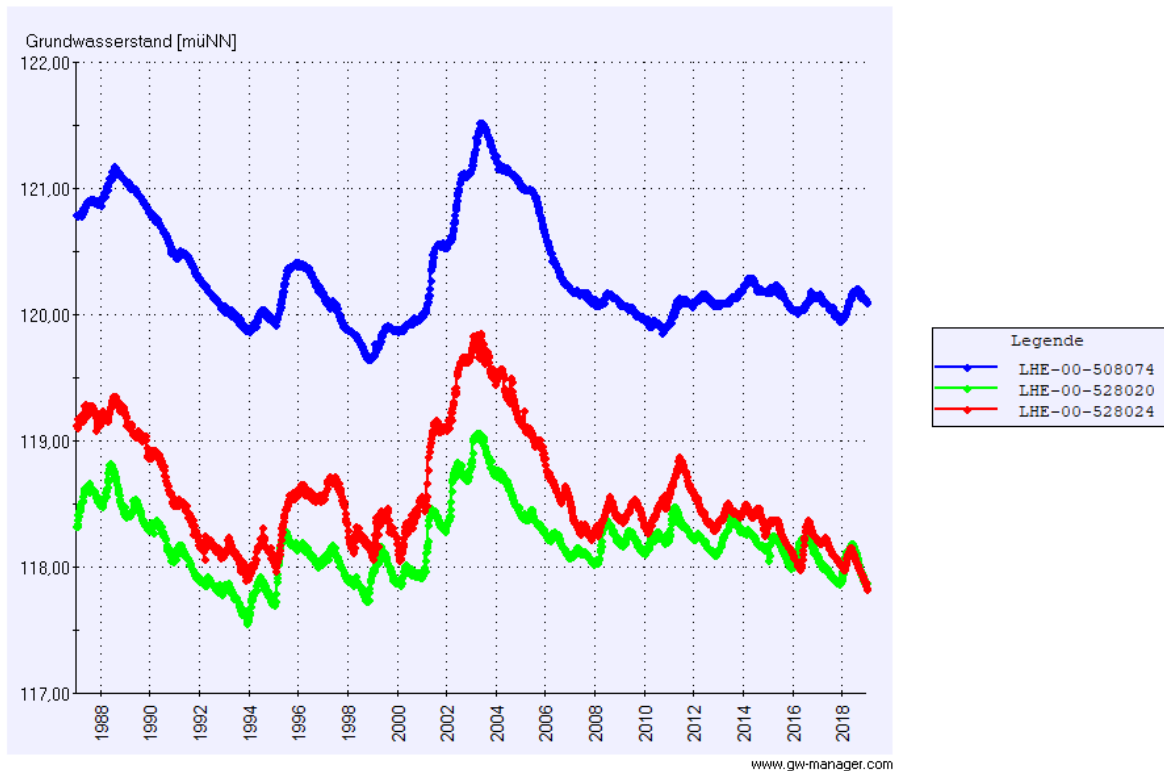


Abb. 12 Langjährige Grundwasserstandsganglinien im Modellgebiet

Anlage 5 zeigt einen aus den gemessenen Grundwasserständen konstruierten Grundwasser-
gleichenplan des 1. Grundwasserleiters oben für Oktober 2013. Dieser Zeitpunkt entspricht weit-
gehend mittleren klimatischen Verhältnissen. Im Untersuchungsgebiet ist der Main als Hauptvor-
fluter für die regionale Grundwasserströmung bestimmend. Die Grundwasserfließrichtung ver-
läuft in weiten Teilen des Modellgebietes in nordöstliche Richtung. Das Gewässernetz ist auf den
Main hin ausgerichtet, wobei die bedeutendsten Fließgewässer im Untersuchungsgebiet die Ro-
dau und die Gersprenz sind. Im Bereich nördlich von Nieder-Roden ist deutlich der Infiltrations-
einfluss der Rodau zu erkennen. In diesem Bereich sind die oberflächennahen Deckschichten
nicht mehr vorhanden, so dass ein direkter Zustrom in den Grundwasserleiter möglich ist. Insbe-
sondere im Nordwesten, im Bereich der Wasserwerke Jügesheim, Martinsee und Hintermark ist
der Einfluss der Grundwasserentnahmen auf das Strömungsbild deutlich zu erkennen, während
weiter östlich, im Bereich der Gewinnungsanlage Lange Schneise, eine weitgehend parallele An-
strömung der Förderbrunnen stattfindet. Kennzeichnend für den Einfluss der Grundwasserent-
nahmen auf das Strömungsbild im Westen ist der Versprung der 121 müNN-Linie in Richtung der
Brunnen I-V des ZVG Dieburg.

4 Modellaufbau

Das Grundwassermodell Untermain wurde mit dem Softwarepaket Spring® der Ingenieurgesellschaft delta h GmbH erstellt. Spring® ist ein modular aufgebautes Programmsystem zur Berechnung von Grundwasserströmungs- und Stofftransportvorgängen. Es beruht auf der Methode der Finiten Elemente (FEM) und erlaubt sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen. Die FEM erlaubt unter anderem das Modellgebiet in Elemente unterschiedlicher Form und Größe zu unterteilen sowie eine Verfeinerung des Netzes in wichtigen Systembereichen. Das Grundwassermodell ist echt dreidimensional, was eine exakte Beschreibung des hydrogeologischen Systems, der Grundwasserströmung, der Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und dem Grundwasser sowie eine tiefendifferenzierte Modellierung von Entnahmen und Infiltrationen erlaubt.

4.1 Abgrenzung und Diskretisierung des Modellraumes

Die Modellstruktur resultiert primär aus der hydrogeologischen Schematisierung, dem Verlauf der Oberflächengewässer und der Lage der Brunnen maßgeblicher Entnehmer. Der Raum des Grundwassermodells umfasst sämtliche Gewinnungsanlagen des ZWO sowie alle Gewinnungsanlagen des ZVG Dieburg (inkl. Schaafheimer Senke). Südlich der Schaafheimer Senke verläuft das Modell entlang des Mains bis Kleinwallstadt mit westlicher Begrenzung durch den Buntsandstein im Odenwald. Das Modell umfasst ausschließlich den Lockergesteinsgrundwasserleiter westlich des Mains.

Die westliche Modellgrenze verläuft entlang einer Störung, die als Grenze des plio-/pleistozänen Grundwasserleiters angesehen wird (Richter 1997).

Die nördliche Modellgrenze orientiert sich an der hydrogeologischen Teilraumabgrenzung zur Wetterau (Fritsche et al. 2003). Hierbei wurde ein Bereich, in dem die vorhandenen tertiären Schichten lokal nur von geringmächtigen Sedimenten überlagert werden, aus dem Modellgebiet ausgeschlossen, da diese wasserwirtschaftlich unbedeutend sind. Der nördliche Modellrand verläuft entlang einer Stromlinie.

Im Osten bildet der Main die Grenze des Modellgebietes. Im Bereich Stockstadt grenzt der Grundwasserleiter an den Stockstädter Kristallinaufbruch (Streit & Weinelt 1971). Das Modellgebiet erstreckt sich hier nicht bis an den Main, sondern verläuft nördlich der Gersprenz entlang der Festgesteinsgrenze und weiter entlang einer Stromlinie bis zum Main.

Die Basis des Modells entspricht der Basis des Pliozän. Im Zentralbereich des Modells ist diese abgeleitet aus Lang (2007, Anlage 3). Im Bereich der Schaafheimer Senke, in der das Lockergestein eine geringere Mächtigkeit aufweist, wurde die Basis neben der Arbeit von Lang (2007) auf Grundlage vorliegender Bohrungen und Aufschlüsse zur Rohstoffgewinnung konstruiert.

Anlage 6 zeigt das Finite-Elemente Netz. Die Netzstruktur orientiert sich am Verlauf der im Modell implementierten Oberflächengewässer und an der Lage der berücksichtigten Brunnen. Die im Modell implementierten Entnahmeknoten entsprechen der tatsächlichen Lage der Brunnen. Im

Bereich maßgeblicher Entnehmer, z.B. der Brunnengalerien der Wasserwerke, wurde das Netz lokal logarithmisch verfeinert, um die dort auftretenden steilen hydraulischen Gradienten adäquat abbilden zu können. In weiten Bereichen ist das Modellgebiet in mehrere Stockwerke untergliedert und die vertikale Netzstruktur gibt die hydrogeologische Schematisierung wieder. Grundwasserentnahmen werden in diesen Bereichen über diejenigen Knoten abgebildet, die eine Elementschicht (Grundwasserleiter) eingrenzen, in der Filterstrecken von Entnahmefrühen liegen. Eine eindeutige Zuweisung der Entnahmen zu den einzelnen Grundwasserleitern ist im Modell damit gegeben.

Das Netz umfasst in horizontaler Richtung ca. 15.700 Knoten und rund 30.800 Elemente. Die Kantenlänge der Elemente liegt im Nahbereich der Brunnen bei ca. 20 m und im übrigen Modellgebiet bei maximal 400 m.

Die konstruierten Trennschichten (Kapitel 3.2.2) wurden in das FE-Netz des Grundwassermodells übertragen. Daraus wurden die Oberkante und die Mächtigkeit der Trennschichten für die Knoten flächenhaft interpoliert. Die verschiedenen Elemente bilden dabei die Umrandung der Schichten einheitlicher geohydraulischer Funktion (Grundwasserleiter bzw. Trennschichten) ab. Wo keine Trennschicht auskartiert wurde, fallen im Modell die Knotenschichten für die Ober- und Unterkante der Trennschicht zusammen. Insgesamt ist das FE-Netz des Grundwassermodells vertikal aus 15 Element- und 16 Knotenschichten aufgebaut. Die obersten Elementschichten entsprechen in großen Teilbereichen der ungesättigten Zone. In Bereichen mit Deckschicht (Schicht 4) stellen die obersten Elementschichten den schwebenden Grundwasserleiter dar. Lokale Trennschichten im 1. Grundwasserleiter liegen auf den Schichten 8 (Oberer Ton bei Zellhausen) und 10 (Trennschicht ZVG). Die 12. Elementschicht entspricht dem Unteren Ton und bildet somit die Grenze zwischen dem 1. und dem 2. Grundwasserleiter. Der Tiefe Zwischenhorizont im 2. Grundwasserleiter im Bereich der Gewinnung Zellhausener Wald liegt auf Schicht 14.

Die Verbreitung der flächenhaft korrelierten Trennschichten im Modell ist in **Anlage 7.1** dargestellt. **Anlage 7.2** bis **Anlage 7.6** zeigen die anhand der beschriebenen Datengrundlage im Modell implementierten Mächtigkeiten und Höhenlagen der Oberkanten der Trennschichten.

Anlage 7.7 zeigt die Implementierung der Trennschichten im Modell anhand eines West-Ost Schnittes durch das Modellschnitt. Der Schnitt entspricht einer geraden Spur entlang der Schnittspur des hydrogeologischen Schnittes 1-1` (Anlage 2.3).

4.2 Randbedingungen

Anlage 6 zeigt den Verlauf der Modellgrenzen, die Modellrandbedingungen sowie die im Modell implementierten Gewässer.

Der westliche Rand wurde als Randzustrom aus dem Festgestein implementiert. Die Randzuströme wurden anhand der Topographie in Einzelabschnitte unterteilt. Die Größenordnung der Zuströme wurde über die Einzugsgebiete der Gewässer abgeschätzt und im Zuge der Modellkalibrierung leicht angepasst.

Der Main bildet den östlichen Rand des Modells und ist mit einer Potentialrandbedingung abgebildet. Für die Pegel Krotzenburg (12/1989 - 12/2018), Mainflingen (04/1988 - 12/2018) und Obernau (11/1988 - 12/2018) wurden für die genannten Zeiträume Monatsmittelwerte der Wasserspiegellagen durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamts Aschaffenburg bereitgestellt. Weiterhin sind für die Staustufen die Wasserstände im Ober- und Unterwasser für Mittelwasser (MW) und die Wasserspiegellagen an Stützstellen bekannt. Die Wasserspiegellagen bzw. Differenzen an den Staustufen wurden als Potentiale über die gesamte Länge des Mains interpoliert.

Im Norden wird das Modell durch eine Randstromlinie begrenzt.

Im Südwesten wird der Modellrand über ein Festpotential abgebildet, das sich aus Daten des HLNUG bei mittleren klimatischen Verhältnissen ergibt (HLUG 2014). Ebenso als Festpotential wird der Modellrand westlich von Großwallstadt abgebildet (TGU 2002).

Die Leakage-Randbedingungen werden unter Kapitel 4.4 behandelt.

4.3 Grundwasserentnahmen

4.3.1 Brunnen

Grundwasserentnahmen im Modellgebiet erfolgen zu einem großen Teil durch die Wasserversorger ZWO und ZVG. Sowohl die meisten Brunnen des ZWO als auch die Brunnen des ZVG Dieburg sind im Modellzeitraum ausschließlich im 1. Grundwasserleiter verfiltert. Lediglich die Brunnen der Gewinnung Seligenstadt (ZWO) und die Brunnen der Gewinnung Zellhausener Wald (ZWO, ab dem Jahr 2016) nutzen das Grundwasser des 2. Grundwasserleiters. Daneben reichen vereinzelt die tiefen Filterstrecken von Brunnen der Gewinnung Lange Schneise (ZWO) bis in den 2. Grundwasserleiter. Die Grundwasserentnahmen des ZWO und des ZVG wurden direkt bei den Wasserversorgern abgefragt.

Neben den Brunnen zur Trinkwasserversorgung werden in den Modellrechnungen auch private Brunnen erfasst. Die Grundwasserentnahmen privater Brunnen wurden beim RP Darmstadt abgefragt. Privatentnahmen mit einer jährlichen Entnahmemenge unter 10.000 m³ wurden nicht berücksichtigt. Für das gesamte Modellgebiet entspricht dies auf Basis von Anzeigen bei den zuständigen Unteren Wasserbehörden und der den Behörden gemeldeten Entnahmen einer Gesamtentnahmemenge von unter 100.000 m³/a für das Jahr 2013. Im Verhältnis zur mittleren Gesamtentnahmemenge im Modellgebiet der Entnehmer über 10.000 m³/a von ca. 30 Mio. m³/a sind die Entnahmen der Kleinstentnehmer nicht relevant für die Modellbilanz. Anlage 8 listet die vom RP übermittelten aktiven Brunnen im Modellgebiet der Kleinstentnehmer mit den gemeldeten Entnahmemengen für den Zeitraum 2009 - 2018.

Die Entnahmen zur landwirtschaftlichen Bewässerung der Beregnungsverbände wurden innerhalb der Berechnung der Grundwasserneubildung berücksichtigt (Kapitel 4.5.9).

Für die Grundwasserentnahmen im Modellgebiet wurden i.d.R. monatliche Gesamtentnahmemengen für den Zeitraum 1987 - 2018 verwendet. Lagen keine monatlichen Entnahmemengen

vor oder waren diese nicht plausibel, wurde die jährliche Entnahmemenge gleichmäßig auf 12 Monate verteilt. Lagen keine Jahresentnahmemengen vor, wurde die genehmigte Entnahmemenge berücksichtigt. Lagen keine Entnahmemengen für die Einzelbrunnen eines Wasserwerkes vor, so wurde die Gesamtentnahmemenge des Wasserwerkes zu gleichen Teilen auf alle Brunnen des Wasserwerkes verteilt.

Für die stationäre Modellrechnung wurden die Jahres-Entnahmemengen der einzelnen Brunnen für das Referenzjahr 2013 implementiert (s. Kapitel 5.2). Tab. 1 listet die im Modell implementierten Entnahmemengen für das für den stationären Modelllauf verwendete Referenzjahr 2013.

Tab. 1 Im Modell implementierte Grundwasserförderung aus Brunnen 2013 [Mio. m³/a]

Trinkwasserversorgung	
ZVG Br. I – XIII	3,43
ZVG Br. E, H, J	0,66
ZVG Br. XIV – XIX	2,49
ZVG Br. Harreshausen	0,05
ZVG Br. Rollwald	0,31
ZWO Seligenstadt	0,80
ZWO Lange Schneise Nord und Süd	5,47
ZWO Lange Schneise Ost	1,62
ZWO Dietzenbach	0,39
ZWO Patershausen	0,62
ZWO Hintermark	1,49
ZWO Martinsee	2,45
ZWO Jügesheim	2,26
ZWO Birkig	0,91
ZWO Lämmerhecke	1,06
ZWO Froschhausen	0,68
Ringheim Br. I und II	0,70
Pflaumheim	0,19
AVG	2,10
Sonstige	
Schwimmbad Babenhausen	0,02
Fa. Eisoldt	0,02
Fa. Eder	0,13
Siemens VDO Automotive AG	0,18
Sanierungsbrunnen VDO	0,63
Robinson	0,01
Fischer	0,02
Wolf	0,03
Rodgauer Baustoffwerke	0,07
Glaab	0,01
Burkard	0,07
Burkard Viehzucht	0,05
SK Heusenstamm	0,06
Gärtnerei Harreshausen	0,05

4.3.2 Baggerseen und Gruben

Aufgrund der intensiven Kiesentnahmen im Modellgebiet werden diese im Modell gesondert berücksichtigt (Nassabbau). Kiesentnahmen sind mit einem Zustrom von Grundwasser verbunden,

welches das entnommene Kiesvolumen auffüllt und somit wie eine Entnahme unter Berücksichtigung eines Porenvolumens von $n=0,2$ des Mineralrohstoffs wirkt.

Die sich mit Grundwasser auffüllenden Kiesgruben werden im Modell entsprechend offener Wasserflächen berücksichtigt und im Bereich ihrer horizontalen Ausdehnung mit einer sehr hohen Durchlässigkeit belegt.

Die im Modell berücksichtigten in Auskiesung befindenden Baggerseen sind in Anlage 6 gekennzeichnet. Die Ausdehnungen der Kiesgruben wurden anhand der Abbauzustände im Jahr 2013 übernommen.

Die Grundwasserentnahmen durch zuströmendes Grundwasser infolge der Auskiesung werden im instationären Datensatz entsprechend vorhandener Daten zur Kiesentnahme berücksichtigt. Für die stationäre Kalibrierung wurde eine Gesamtentnahme aus den Kiesgruben von 0,6 Mio. m^3/a entsprechend der Entnahmen aus dem Jahr 2013 berücksichtigt.

Der Abbau an der Bong'schen Tongrube (bei Zellhausen) erfolgte bis Ende 2007. Der Abbau erfolgte bis auf den Unteren Ton. Entsprechend werden hier die Schichten 1-11 mit einer sehr hohen Durchlässigkeit belegt.

Östlich der Bong'schen Tongrube liegt eine ehemals geplante Sondermülldeponie (HIM). Hier wurde eine Dichtwand bis auf den Unteren Ton niedergebracht. Der Bereich wird mit einem geringem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ in den Schichten 1-11 belegt.

4.4 Fließgewässer

Die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und Grundwasser erfolgen im Wesentlichen durch Infiltration von Fließgewässerwasser in das Grundwasser oder Exfiltration von Grundwasser in das Fließgewässer. Dies wird modelltechnisch über Vorflutpotentiale (Wasserstände) und Leakagekoeffizienten (Faktor zur Beschreibung der Durchlässigkeit des Gewässerbettes) umgesetzt. Durch Multiplikation der Differenz des vorgegebenen Wasserstands im Fließgewässer H_{vorf} - Grundwasserstand H_{gw} mit dem Leakagekoeffizienten wird die In- bzw. Exfiltrationsrate iterativ ermittelt. Für die Modellsoftware Spring wird ein in die Zeiteinheit umgerechneter Leakagekoeffizient (L) durch das Attribut LERA wie folgt definiert:

$$L = LERA * l = \alpha * A$$

L	= Leakagefaktor [m^2/a]
LERA	= polygonbezogener Leakagefaktor [m/a]
l	= Länge zwischen den Modellknoten [m]
A	= Anteilig durchströmte Fläche der Sohle des Vorfluters [m^2]
α	= Leakagekoeffizient [$1/\text{a}$]

Bei negativer Differenz erfolgt Exfiltration (Grundwasser tritt in das Fließgewässer aus), bei positiver Differenz infiltriert Wasser aus dem Fließgewässer in das Grundwasser. Darüber hinaus

können die Infiltrations- und Exfiltrationsraten im verwendeten Programmsystem SPRING durch Angabe eines Maximalwertes begrenzt werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Simulation der Fließgewässer-Grundwasser Interaktion ist der dreidimensionale Modellaufbau. Bei zweidimensionalen oder mehrschichtigen zweidimensionalen Horizontalmodellen kann ein Potentialabbau bei der Infiltration aus Fließgewässern nur in horizontaler Richtung stattfinden. Der in der Realität durch die Strömungskomponente in vertikaler Richtung stattfindende Potentialabbau kann dann nur durch einen gegenüber der dreidimensionalen Modellierung verringerten Leakagekoeffizienten bzw. durch im Nahbereich des Fließgewässers verringerte k_f -Werte Berücksichtigung finden. Das Fließgewässer kann sich bei der zweidimensionalen Modellierung auch immer nur über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters auswirken, während bei dreidimensionalen Modellen die Infiltration tatsächlich in Modellschichten stattfindet, die den oberen Bereich des Grundwasserleiters abbilden und die Auswirkungen der Wechselwirkung mit Fließgewässern auf die tieferen Schichten dann in Abhängigkeit von horizontalen und vertikalen Durchlässigkeiten kontinuierlich abnimmt.

Die im Modell mit Potentialen und Leakagekoeffizienten berücksichtigten Vorfluter sind in Anlage 6 gekennzeichnet.

Gersprenz und Rodau stellen aufgrund ihrer hohen Abflüsse die wichtigsten Fließgewässer im Modellgebiet dar. Die Rodau beeinflusst maßgeblich die Grundwasserstände im nördlichen sowie im nordwestlichen Untersuchungsraum. Die Gersprenz determiniert den Grundwasserstand insbesondere im östlichen Modellgebiet.

Für Rodau und Bieber liegen Vermessungsdaten aus dem Jahr 2006 vor (Unger 2006). Darauf aufbauend wurden Wasserspiegellagenberechnungen für den Mittelwasserabfluss (MQ) berechnet. Der MQ-Zuwachs entlang der Gewässer resultiert aus den Einleitungen aus Kläranlagen und den Zuflüssen aus den natürlichen Teilgebieten.

Für die Gersprenz liegt ein wasserwirtschaftliches 2D-Modell vor. Für den instationären Eingabedatensatz mit monatlichen Werten der Wasserspiegellagen wurden entlang einer zentralen Linie im Gewässer Sohlhöhen sowie Wasserspiegellagen für Q_{30} (Abfluss an 30 Tagen unterschritten) und Q_{330} (Abfluss an 330 Tagen unterschritten) zur Verfügung gestellt. Für die instationären Berechnungen werden die Wasserspiegellagen an einen für das Gebiet charakteristischen Pegel gekoppelt. Hierfür liegen vom HLNUG für den Pegel Harreshausen Monatsmittelwerte des Abflusses von 1987-2018 vor (Abb. 13). Durch die Abflussmessungen am Pegel Harreshausen wird eine Abflusskurve erstellt. Mit der Kopplung der Wasserspiegellagen sowie der Abflussganglinie und der Abflusskurve des Pegels wird für jeden einzelnen Gewässerknoten des Grundwassermodells der Wasserstand für jeden Zeitpunkt t (Monatsmittelwert) ermittelt.

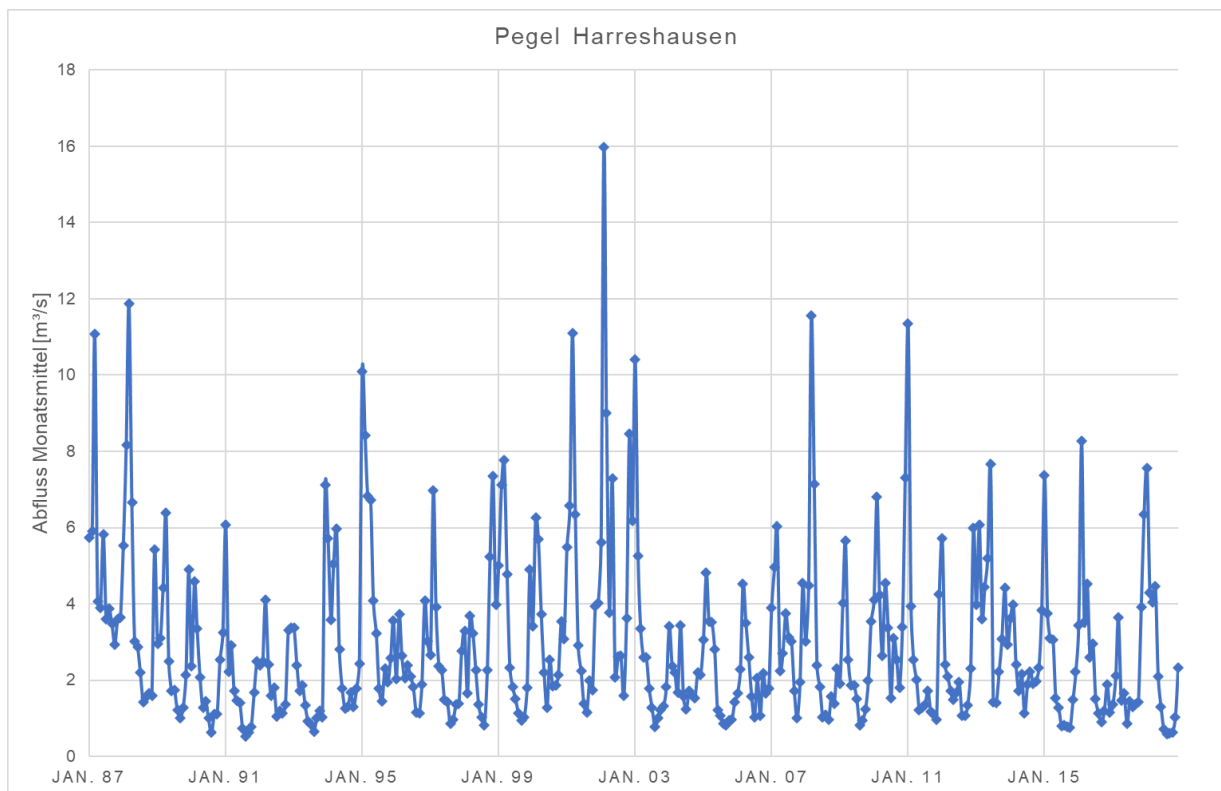


Abb. 13 Monatsmittelwerte Abfluss Pegel Harreshausen

Der südwestliche Modellbereich südlich der Gersprenz ist stark geprägt von Gräben und kleinen Vorflutern. Diese sind stationär in das Modell implementiert. Falls hierfür keine Pegeldaten vorlagen, wurden die Wasserspiegelhöhen geschätzt. Anhand von Vor-Ort-Begutachtungen wurde das In- und Exfiltrationsverhalten der Gewässer abgeschätzt.

4.5 Flächenhafte Grundwasserneubildung

4.5.1 Vorbemerkungen

In regionalen Grundwassermodellen ist die Grundwasserneubildung eine maßgebliche Bilanzgröße. Im Rahmen instationärer Modellrechnungen muss aufgrund der zeitlichen und räumlichen Dynamik des Klima- und Grundwassergeschehens eine möglichst detaillierte Charakterisierung der flächenhaften Grundwasserneubildung erfolgen. Kernpunkt der Betrachtung ist hierbei die ungesättigte Bodenzone, da aus der Wechselbeziehung Boden/Vegetation mit dem übergeordneten Klimageschehen letztlich die effektive Grundwasserneubildung resultiert.

Für die Charakterisierung des Gebietswasserhaushaltes innerhalb des numerischen Grundwassermodells stellt sich somit die Frage nach der Einflussintensität der einzelnen hydrologischen Prozesse, deren Parametrisierung und deren gegenseitige Abhängigkeit. Ziele der Bearbeitung waren in erster Linie quantitative Aspekte der Grundwasserneubildung. Zudem sollte durch die Bodenfeuchtesimulation ein Prognoseinstrument für weitere Kernfragen der gezielten Grundwasserbewirtschaftung geschaffen werden, da auch Fragestellungen zum Stofftransport im

Sickerwasser oder landwirtschaftliche und naturschutzfachliche Anforderungen an den Standortwasserhaushalt eine Analyse der ungesättigten Bodenzone erfordern. Bei der dezentralen Bereitstellung von Beregnungswasser wurde die Grundwasserentnahme aus den zahlreichen Einzelbrunnen indirekt ermittelt, indem der Zusatzwasserbedarf der beregnungsbedürftigen Ackerkulturen in den Wasserhaushaltsberechnungen ermittelt wurde und um diesen Betrag die Grundwasserneubildung unter den beregneten landwirtschaftlichen Flächen reduziert wurde.

Es zeigt sich hierbei, dass die Modelltechnik im kleinräumigen Maßstab bei der Darstellung und Simulation komplexer Prozesse des Wasser- und Stofftransportes in einem sehr engen Vertrauensbereich arbeiten kann, was jedoch oftmals mit einer hohen Anzahl von Eingangsparametern verknüpft ist. Grundlegend wurden bei den konzeptionellen Überlegungen folgende Aspekte berücksichtigt:

- Wissenschaftlicher Kenntnisstand der Modelltechnik,
- Verfügbarkeit der modellspezifischen Eingangsparameter,
- Vertrauensbereiche der Ergebnisse bzw. Verifikationsmöglichkeiten,
- Regionalisierungsproblem - Frage nach Relevanz und räumlicher Variabilität einzelner Einflussfaktoren innerhalb eines regionalisierten Maßstabes.

4.5.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts

Die prozessbasierte Modellierung des Bodenwasserhaushalts erfolgte mit Hilfe der hydrologischen Modellierungs- und Simulationssoftware MIKE SHE.

Die horizontale Diskretisierung des das Untermainingebiet abbildenden numerischen Rechenmodells erfolgte in einem gleichmäßigen, quadratischen Raster mit einer Seitenlänge von 200 m. Es besteht aus über 8.000 Rasterzellen. Die räumliche Auflösung des Modells stellt dabei einen Kompromiss dar zwischen einer möglichst feinen Diskretisierung des Modellgebietes und der damit verbundenen Simulationsdauer. Die gewählte Auflösung ist insbesondere hinreichend, die charakteristischen Bodenformen in ihrer räumlichen Verbreitung im Modell abzubilden.

Die zeitliche Diskretisierung des Simulationszeitraumes von 1987 bis 2018 erfolgte in Zeitschritten mit einer maximalen Länge von 30 Minuten, wobei diese zu Zeitpunkten mit hohen hydraulischen Gradienten an der Geländeoberfläche (z.B. bei starkem Niederschlag) von der Simulationssoftware dynamisch auf bis zu 1 Minute verkürzt wurden.

4.5.3 Abgebildete Prozesse und Eigenschaften

Abb. 14 skizziert in einer Übersicht die wichtigsten im Rahmen der Simulation berücksichtigten hydrologischen Prozesse. Neben dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung als Eingangsgrößen werden im Rahmen der Modellrechnungen alle den Bodenwasserhaushalt betreffenden relevanten Prozesse wie Interzeption, Transpiration, Evaporation, Pflanzenwachstum, Wurzelwasseraufnahme, Versickerung und kapillarer Aufstieg simuliert. Wegen der geringen Reliefenergie wird ein längerer lateraler Transport bis in ein Fließgewässer (Oberflächenabfluss) nicht betrachtet.

In der Modellrechnung der ungesättigten Zone wurde die Grundwasserneubildung an der Grundwasseroberfläche ermittelt. Ein Fluss in das Grundwasser wird als positive Grundwasserneubildung und ein Fluss aus dem Grundwasser durch kapillaren Aufstieg als negative Grundwasserneubildung (Grundwasserzehrung) gewertet (hydraulischer Gradient im geschlossenen Kapillarsaum = 1).

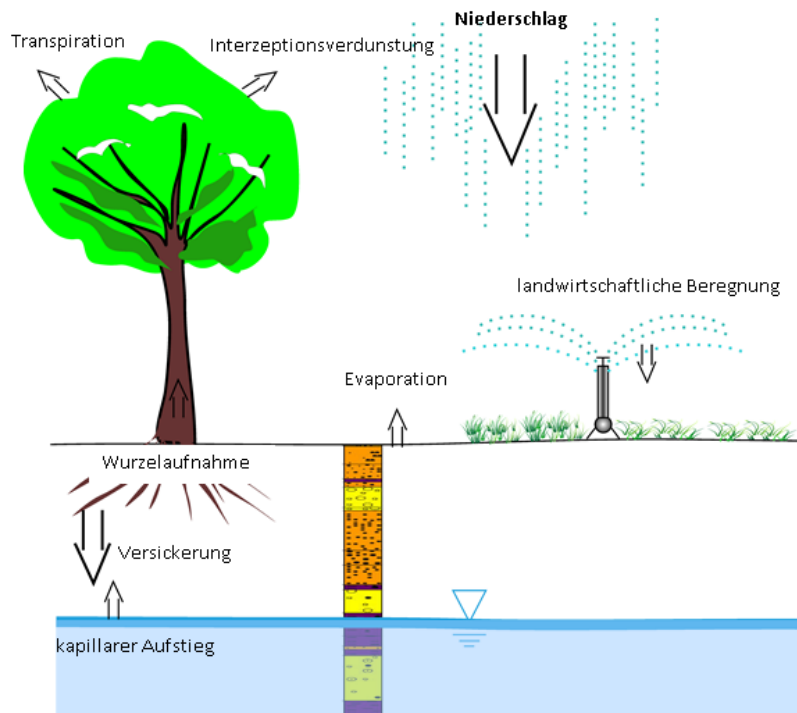


Abb. 14 Prozesse des Bodenwasserhaushaltes

4.5.4 Niederschlag und potentielle Verdunstung

Niederschläge und potentielle Verdunstung im Untersuchungsgebiet wurden mit Hilfe des Programmpakets WaSiM-ETH regionalisiert. Hierfür wurden die Tageswert-Zeitreihen von den in Tab. 2 genannten Niederschlags- und Klimamessstellen aufbereitet und mittels einer Kombination von höhenabhängiger und inverser distanzgewichteter Interpolation (IDW) auf das MIKE-SHE-Modellraster mit 200 m Rasterweite interpoliert.

Für die Grasreferenzverdunstung lagen nach Penman-Monteith bzw. FAO-56 berechnete Werte vor, die direkt auf das Ausgaberraster interpoliert werden konnten. Um in der unregelmäßigen räumlichen Verteilung der Stationen begründete Artefakte zu adressieren, ging das Höhenregressionsverfahren zu 75 %, das IDW-Verfahren zu 25% ins Endergebnis ein.

Die Niederschlagswerte der Niederschlagsmessstellen wurden zunächst korrigiert. Hierfür wurde das in WaSiM-ETH integrierte Modul zur temperatur- und windabhängigen Korrektur nach Sevruk (1986) verwendet. Die Korrektur der Niederschläge erfolgte hier - abhängig von der Lufttemperatur - getrennt nach Regen und Schnee. Als Eingangsdatensätze wurden demnach - neben den

Niederschlagsmengen - Windgeschwindigkeit und Lufttemperaturen in 2 m Höhe benötigt. Während die Temperaturen in der benötigten Form vorlagen, mussten die Winddaten zunächst von der jeweiligen Sensorhöhe auf Bezugshöhe 2 m umgerechnet werden. Die Niederschlagskorrektur nach Sevruk (1986) führt zu ca. 3 % höheren Werten im Vergleich zu unkorrigierten Niederschlagshöhen.

Die Korrektur der Niederschlagsdaten selbst erfolgte in einem Zug mit der Regionalisierung. Im Verlauf dieses Prozesses wurden zunächst die für die Klimastationen vorliegenden Sekundärdaten (Wind und Temperatur) auf die Koordinaten der Niederschlagsstationen interpoliert und die Korrektur der Niederschlagstageswerte durchgeführt. Abschließend wurden die korrigierten Niederschlagsdaten auf das Ausgabegeraster interpoliert. **Anlage 9.1** zeigt im Betrachtungszeitraum 1984 bis 2018 die flächenhafte Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagshöhe und die flächenhafte Verteilung der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstungshöhe der klimatischen Eingabedaten für das Bodenwasserhaushaltsmodell.

Tab. 2 Niederschlags- und Klimastationen zur Regionalisierung von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration (Etp)

Stationsname	Niederschlag	Etp	Datenzeitraum
Dietzenbach	X		2014 – 2018
Frankfurt/Main	X	X	1987 - 2018
Frankfurt/Main – Westend	X	X (ab 1991)	1987 - 2018
Alzenau	X		1987 - 2017
Groß-Umstadt (Kläranlage)	X		1987 - 1997
Großostheim	X		1987 - 2002
Hanau-Großauheim	X		1987 - 1996
Heusenstamm	X		1987 - 2000
Kahl/Main	X	X	1987 - 2018
Babenhausen-Harreshausen	X		1987 - 2018
Babenhausen-Hergershausen	X		1987 - 1996
Langen	X		1987 - 2002
Mühlheim/Main	X		1987 - 2018
Messel	X		1987 - 2018
Neu-Isenburg	X		1987 - 2008
Offenbach/M, (Stadt)	X		1987 - 1995
Rödermark-Ober-Roden	X		1987 - 2018
Schaafheim-Schlierbach	X	X	1987 - 2018
Mainhausen-Zellhausen	X		1987 - 2018
Offenbach-Wetterpark	X	X	2005 - 2018
Darmstadt	X	X	1995 - 2018
Darmstadt(A)	X		1987 - 1995
Dieburg	X		1987 - 2018

4.5.5 Böden und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone

Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes des Bodens und der tieferen Schichten (ungesättigte Zone) sind die Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften (bodenhydraulische Eigenschaften) maßgebend. Als Arbeitsgrundlage im Untersuchungsgebiet dienten die digitalen Bodenflächen-daten (Kartiermaßstab 1:50.000) der BFD-50-Karte Hessen und Bohrungen aus dem Modellgebiet. Für den bayerischen Teil des Modellgebiets wurde die Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000 (ÜBK25) verwendet.

Zunächst wurden den einzelnen Böden in den typisierten Bodeneinheiten der BFD-50 und ÜBK25 Karten ihre bodenhydraulischen Kennwerte aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Bodenkunde 2005) zugewiesen. In einer Clusteranalyse mit den Kriterien Schichtmächtigkeit, Speichervermögen und Durchlässigkeit wurden insgesamt 15 Bodenprofilklassen mit unterschiedlichen bodenhydraulischen Eigenschaften identifiziert, die sich aus insgesamt 21 Bodenarten zusammensetzen und sich in ihrem vertikalen Aufbau voneinander unterscheiden (**Anlage 9.2**).

Der Aufbau der Schichten in Tiefen größer 2 m wurde aus den Profilen von für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Bohrungen abgeleitet. Im Wesentlichen stehen Sande an. Die vertikale Diskretisierung dieser Bodenprofile erfolgte in Schichten mit einer über die Tiefe ansteigenden Mächtigkeit von 1 cm an der Geländeoberfläche bis zu 2 m in der unteren ungesättigten Zone.

Die ungesättigte Bodenwasserbewegung wird mit dem physikalisch begründeten Richards-Ansatz beschrieben. Die Parametrisierung der ungesättigten hydraulischen Bodeneigenschaften (Retentionskurve, ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit) erfolgte getrennt für jede Bodenart über die Methode von Mualem und van-Genuchten. Die Kennwerte der Lockergesteine basieren auf den Verknüpfungsregeln der Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der BGR. Die k_r -Werte wurden aus der Tabelle 76 der Bodenkundlichen Kartieranleitung übernommen.

4.5.6 Landnutzung

Die Landnutzung im Modellgebiet beruht auf einer multitemporalen Satellitenbilddauswertung für das Jahr 2000 mit einer räumlichen Auflösung von 15 m. Es wurden 17 Nutzungsklassen abgegrenzt. In den Siedlungsbereichen werden 3 Versiegelungsgrade unterschieden (**Anlage 9.3**).

4.5.7 Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg

Bei Böden mit Stauhorizonten in relevanten Tiefen bzw. bei entsprechenden Grundwasserflurabständen wird der Pflanzenwasserbedarf nicht nur aus dem Bodenwasserspeicher sondern auch durch kapillaren Aufstieg gedeckt.

Die Wirkung von Stauhorizonten auf den Bodenwasserhaushalt wird durch die schichtengerechte Erfassung der ungesättigten Zone berücksichtigt. Um den Einfluss des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser abzubilden, fanden die mittleren Grundwasserstände (2013, s. Kapitel 5.2) als untere Randbedingung Eingang in den Modellrechnungen in der ungesättigten Zone.

4.5.8 Tatsächliche Verdunstung von Landflächen

Die Verdunstung von bewachsenen Böden wurde in die Prozesse Bodenevaporation, Transpiration und Interzeptionsverdunstung untergliedert. Der Ansatz zur Berechnung der Bodenevaporation berücksichtigte den Bodenwassergehalt und die Vegetation. Lediglich bei vegetationsfreien Böden und optimaler Wasserversorgung der Bodenoberfläche entspricht die Bodenevaporation der potentiellen Verdunstung.

Für jede vegetative Nutzungsklasse wurde das Pflanzenwachstum anhand der saisonalen Entwicklung zeitlich variierend für Blattflächenindex, Wurzeltiefe und k_c -Faktor (pflanzen-spezifische Korrektur der Grasreferenzverdunstung) vorgegeben. Die Daten wurden aus einschlägigen Datenbanken und Literaturangaben abgeleitet.

Der Interzeptionsspeicher ist eine Funktion des Blattflächenindex. Bei gefülltem Speicher entspricht die Interzeptionsverdunstung der potentiellen Verdunstung. Der Verdunstungsanspruch wird zunächst aus dem Interzeptionsspeicher gedeckt. Die Speicherfüllung erfolgt, indem von jedem Niederschlag Benetzungsverluste bis zur Speicherfüllung abgezogen werden, die Überschussmenge infiltriert in den Boden (max. bis zur Infiltrationskapazität).

Die Verknüpfung der einzelnen Prozesse zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung erfolgte anhand der Methode von Kristensen & Jensen (1975). Anhand der potentiellen Verdunstung wurden zur Laufzeit Interzeption, Interzeptionsverdunstung, Transpiration und Evaporation unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Entwicklung der jeweiligen kulturspezifischen Daten (Blattflächenindex, k_c -Faktor, Wurzelwachstum und -verteilung) in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Landnutzung und der Bodenfeuchte(-verteilung) in der effektiven Wurzelzone ermittelt.

Die Verdunstung offener Wasserflächen wird mit der klimatischen Wasserbilanz approximiert.

4.5.9 Landwirtschaftliche Bewässerung

Der Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisiert entsprechend der Geisenheimer Methode zur Bewässerungssteuerung ermittelt. Die Geisenheimer Methode zur Bewässerungssteuerung wird auch bei der landwirtschaftlichen Beregnungsberatung eingesetzt. Als Steuergröße für die Applikation von Bewässerungswasser wurde die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) herangezogen. Hierbei wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisch eine Bewässerungsgabe von bis zu 30 mm/Tag auf diejenigen landwirtschaftlich beregneten Flächen angesetzt, deren Bodenfeuchte im durchwurzelter Bereich der ungesättigten Bodenzone auf einen Wert unter 50% nFKWe fiel. Abgeschaltet wurde die Beregnung automatisch beim Erreichen von 80% nFKWe. Die oberen und unteren Grenzen wurden im Gemüsebau auf 70% nFKWe bzw. 90% nFKWe angehoben.

Das Bewässerungswasser stammt zum überwiegenden Teil aus dem Grundwasser, das in der Regel direkt „vor Ort“ aus sog. Beregnungsbrunnen gefördert wird.

Die Beregnungsentnahmen aus dem Grundwasser erfolgen überwiegend aus Saugbrunnen, die in der Regel mit einer geringen Bohrtiefe hergestellt wurden und das oberflächennahe Grundwasser fassen. Eine direkte Berücksichtigung dieser Grundwasserentnahmen durch eine Implementierung der Saugbrunnen im Grundwassermodell ist praktikabel nicht möglich. Die Grundwasserentnahmen zur Deckung des Bewässerungsbedarfs mittels Saugbrunnen wurden berücksichtigt, indem der berechnete Bewässerungsbedarf von der Grundwasserneubildung unter den in den Modellrechnungen tatsächlich beregneten Flächen subtrahiert wurde.

4.5.10 Ergebnisse

Aus der für den Zeitraum 1987 – 2018 berechneten Grundwasserneubildung wurde für das stationäre Grundwassermodell der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse wurden mittels GIS-Verschneidung auf das Finite-Elemente-Netz des Grundwassermodells übertragen.

Die für mittlere klimatische Verhältnisse ermittelte Grundwasserneubildung ist in **Anlage 9.4** dargestellt und beträgt im gesamten Modellgebiet 47 Mio. m³/a. Bei einer Gesamtfläche von rund 335 km² ergibt sich im Gesamtgebiet eine mittlere Grundwasserneubildung von ca. 140 mm/a. Der berechnete mittlere Bewässerungsbedarf beträgt ca. 700.000 m³/a.

Abb. 15 zeigt die flächengemittelte jährliche Grundwasserneubildung für das gesamte Modellgebiet für den im instationären Modelllauf berücksichtigten Zeitraum 1987 – 2018. Für die instationären Modellrechnungen wurden die monatlichen Summen der berechneten Grundwasserneubildung verwendet.

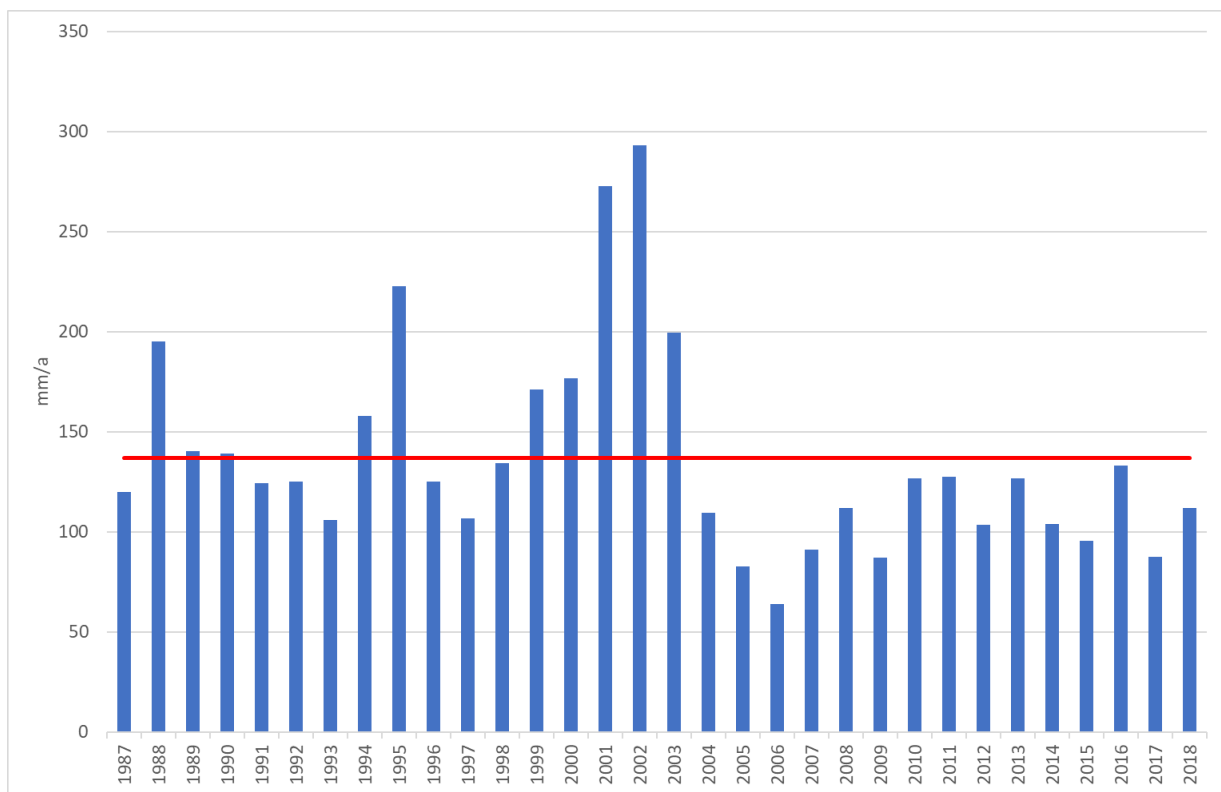


Abb. 15 Flächengemittelte jährliche Grundwasserneubildung [mm/a]

Bei einer mittleren jährlichen Niederschlagshöhe für den Zeitraum 1987-2018 von 720 mm/a beträgt die berechnete mittlere Neubildungsrate von 140 mm/a ca. 19%.

5 Modellkalibrierung

5.1 Allgemeines

Nach Netzgenerierung und Parameterzuweisung ist das Modell zu kalibrieren. Dies ist erforderlich, da zum einen nicht alle Parameter im Vorhinein in der erforderlichen Genauigkeit zu ermitteln sind und zum anderen sind Eigenschaften, z.B. Durchlässigkeitsbeiwerte aus Pumpversuchen, u.a. auf Grund ggf. unterschiedlicher Modellkonzepte nicht unmittelbar in ein numerisches Modell übertragbar. Es sind effektive Parameter zu bestimmen, die in Abhängigkeit von der Modellkonzeption die zu untersuchenden Prozesse hinreichend beschreiben. Mit der Kalibrierung wird das Modell den zu beschreibenden Prozessen im abgebildeten System angepasst.

Zur Überprüfung dient bei der stationären Modellkalibrierung eine an einem Stichtag gemessene Grundwasseroberfläche, bei der instationären Modellkalibrierung sind entsprechend die Grundwasseroberflächen verschiedener Zeitpunkte mit den berechneten Grundwasserständen zu vergleichen. Ebenso sind bei der instationären Kalibrierung auch berechnete und gemessene Grundwasserstandsganglinien gegenüberzustellen.

Das Grundwassermodell wurde zunächst stationär unter den Randbedingungen und den Grundwasserständen im Oktober des Jahres 2013 kalibriert. Es ist zu beachten, dass bei einer stationären Modellkalibrierung mehrere Parametersätze einen Systemzustand beschreiben können. Nur wenn das Modell über einen längeren Zeitraum die entsprechenden Prozesse bei unterschiedlichen Systemzuständen zufriedenstellend simuliert, kann ein eindeutiger Parametersatz gefunden bzw. die Mehrdeutigkeit in der Kalibrierung stark reduziert werden. Entsprechend wurden im Rahmen einer instationären Modellkalibrierung für den Zeitraum 1987 bis 2018 die im Zuge der stationären Kalibrierung ermittelten Parameter weiter angepasst.

5.2 Stationäre Modellkalibrierung

Wesentliche Vorbedingung für eine sinnvolle stationäre Kalibrierung ist die Wahl eines möglichst stationären - langjährig mittleren Verhältnissen - entsprechenden Bezugszeitpunkts, da dann Speichereffekte vernachlässigt werden können. Zeitpunkte, die kurz (d.h. im regionalen Maßstab wenige Jahre) nach Beginn einschneidender Bewirtschaftungsmaßnahmen bzw. wesentlicher Änderungen von Fördermengen oder witterungsbedingten Nass- und Trockenperioden liegen, sind nicht geeignet, da die gemessene Grundwasseroberfläche dabei einen instationären Zustand repräsentiert, dessen Nachbildung in einem stationären Modell zu Fehlern in der Kalibrierung führen muss.

Zweckmäßig geschieht die Bilanzierung des Grundwasserumsatzes über ein ganzes Jahr, da dadurch die saisonalen Schwankungen bei der Grundwasserneubildung aus der Berechnung ausgeklammert werden. Der Bezugszeitpunkt sollte etwa um den Oktober herum gewählt werden, zu dem die stark instationären Auswirkungen der hauptsächlich im Winter und Frühjahr stattfindenden Grundwasserneubildung weitgehend abgeklungen sind.

Weiterhin sind für die Kalibrierung eine möglichst hohe Dichte an Messwerten wichtig, um die Güte der Modellberechnungen beurteilen zu können. Im Modellgebiet Unterrhein sind hauptsächlich Landesmessstellen, Messstellen des ZVG Dieburg und Messstellen des ZWO vorhanden.

Zur Ableitung eines repräsentativen Zeitpunktes für die stationäre Kalibrierung wurden im gesamten Modellgebiet Grundwasserstandsganglinien der letzten 20 Jahre ausgewertet. Nach Höchstwerten der Grundwasserstände in den Jahren 2002 - 2003 fielen die Grundwasserstände im gesamten Modellgebiet. Mittlere Grundwasserverhältnisse wurden an einem Großteil der Messstellen gebietsübergreifend im Oktober 2013 erreicht. Abb. 16 zeigt hierzu exemplarisch Grundwasserstandsganglinien nördlich von Babenhausen (LHE-00-528020), in der Schaafheimer Senke (LHE-00-528024) und westlich von Jügesheim (LHE-00-508074).

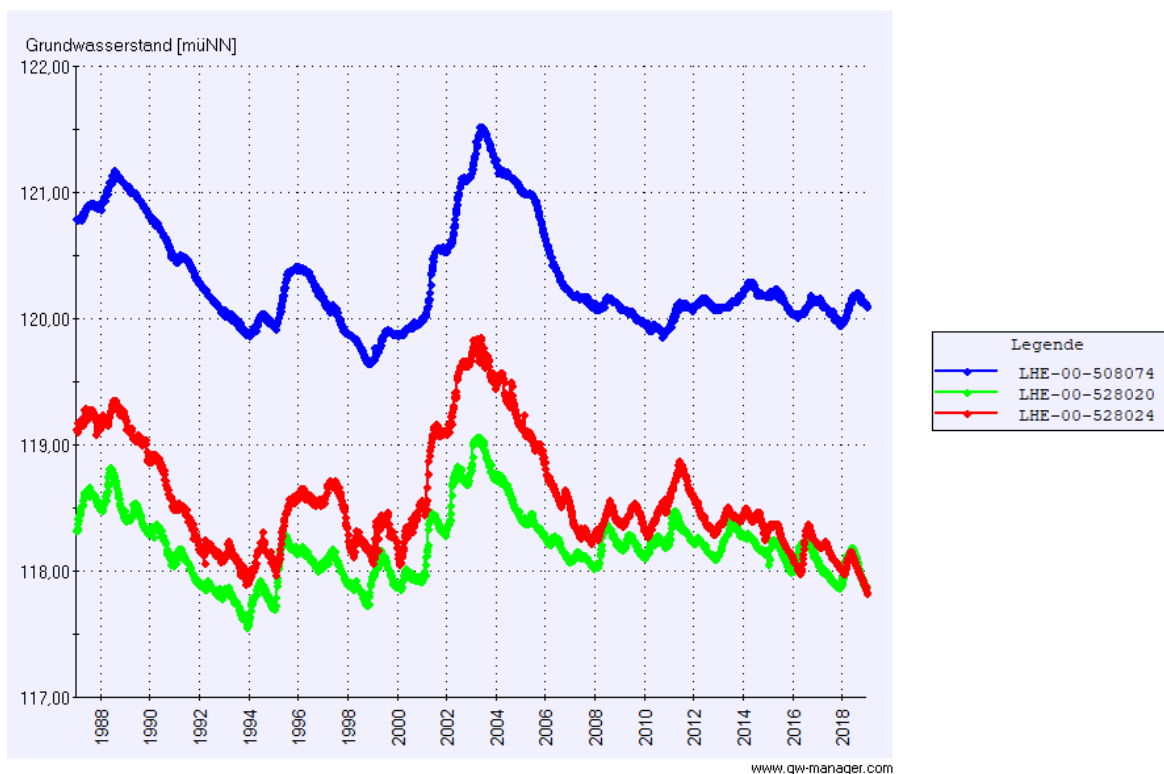


Abb. 16 Langjährige Grundwasserstandsganglinien zur Definition des stationären Kalibrierzeitpunktes

5.2.1 Variation der Modellparameter

Im Rahmen der Kalibrierung erfolgte eine Variation der Modellparameter bis eine hinreichende Übereinstimmung der gemessenen mit den errechneten Grundwasserständen erreicht wurde.

Im stationären Modell wurden folgende Parameter kalibriert:

- k_f -Werte
- Zustrom über die Modellränder
- In- und Exfiltration beschreibende Leakagekoeffizienten der Fließgewässer

Ausgangspunkt für die Kalibrierung der k_f -Werte bildeten die kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte der im Jahr 2013 erstellten Modellversion. Das stationäre Modell wurde in der vorherigen Version für den Zeitpunkt Oktober 1997 kalibriert. Die Ermittlung der k_f -Werte erfolgte hier soweit vorhanden anhand von Pumpversuchen. Zusätzlich wurden weitere vorhandene Untersuchungen zur Plausibilitätskontrolle herangezogen (TGU 2002, ERM 2002). Die Durchlässigkeitswerte im Bereich der Modellerweiterung wurden weitestgehend von TGU (2002) übernommen.

Die vertikale Durchlässigkeit wurde nicht gesondert kalibriert. Sie wurde durch ein konstantes Verhältnis (1/10 der horizontalen Durchlässigkeit des einzelnen Elementes) festgelegt, das der Anisotropie der Durchlässigkeit im Maßstab regionaler Grundwassermodelle aus Erfahrungswerten entspricht (König et al. 2021).

Für die effektive Porosität wurde ein Wert von 0,2 angesetzt. Wegen der vergleichsweise geringen Sensitivität dieses Parameters in instationären Modellläufen wurde nicht angestrebt, den durchflusswirksamen Porenanteil zu differenzieren.

Der Startwert für den Zustrom über die Modellränder wurde anhand der außerhalb des Modellgebietes liegenden Einzugsgebiete bestimmt. Hierbei wurde in einem 1. Schritt die Größe der Einzugsgebiete mit einer mittleren Grundwasserneubildung von ca. 140 mm/a multipliziert und der entsprechende Zustrom auf die in dem Bereich des Einzugsgebietes liegenden Knoten gleichmäßig verteilt. Im Zuge der Kalibrierung wurde der Randzustrom schrittweise reduziert. Somit wurde auch der aus den Einzugsgebieten nicht vorab bestimmte Abfluss in Fließgewässer berücksichtigt.

Die Leakageparameter der Fließgewässer wurden innerhalb plausibler Grenzen der Gewässerabflüsse angepasst. Die im Rahmen der stationären Kalibrierung ermittelten Leakageparameter der Fließgewässer wurden in der instationären Kalibrierung weiter angepasst. Diese Parameter bestimmen maßgeblich die Austauschraten zwischen den Fließgewässern und dem Grundwasser.

5.2.2 Ergebnisse der stationären Modellkalibrierung

Anlage 10 zeigt die Messwerte und berechneten Grundwassergleichen im 1. Grundwasserleiter für den Kalibrierzeitpunkt Oktober 2013 bei mittleren klimatischen Verhältnissen.

Im südwestlichen Modellgebiet (Dieburger Bucht) ergeben sich im Bereich, in dem die Trennschicht ZVG vorhanden ist, Unterschiede in den Potentialen im oberen und unteren 1.

Grundwasserleiter. Deutlich ist z.B. der Einfluss der Fließgewässer auf die Grundwassergleichen im 1. Grundwasserleiter oben zu erkennen, die durch Exfiltration ein Rückspringen der Gleichen bewirken.

Insbesondere im Bereich der Brunnen des ZVG ergeben sich leichte Abweichungen. Die Ursache liegt vor allem in der intensiven Grundwasserbewirtschaftung und den damit verbundenen instationären Bedingungen im Bereich großer variabler Grundwasserentnahmen.

5.3 Instationäre Modellkalibrierung

Die instationäre Kalibrierung wurde für den Zeitraum 1987 – 2018 durchgeführt. Dieser Zeitraum umfasst die Trockenperiode der 1990er-Jahre, die Nassperiode Anfang der 2000er-Jahre sowie die der Nassperiode nachfolgenden trockenen Jahre.

5.3.1 Aufbau des instationären Eingabedatensatzes

Der instationäre Datensatz wurde für monatliche Zeitschritte erstellt. Folgende Randbedingungen wurden instationär berücksichtigt:

- Festpotentialränder (Main),
- Wasserstände der Gersprenz,
- Grundwasserneubildung und
- Entnahmen

Die Datengrundlagen sind in Kapitel 4 erläutert.

5.3.2 Kalibrierte Modellparameter

Die Modellgüte wurde anhand der Übereinstimmung berechneter Grundwasserstandsganglinien mit gemessenen Grundwasserständen und Gleichenplänen ausgewählter Zeitpunkte bestimmt.

Innerhalb der instationären Modellkalibrierung wurden Durchlässigkeiten kleinräumiger angepasst. Insbesondere die Durchlässigkeit der Deckschicht erwies sich als sensibler Parameter für den zeitlichen Verlauf der Grundwasserstände.

Anlage 11 zeigt die kalibrierten k_f -Werte für den 1. Grundwasserleiter (bzw. den 1. Grundwasserleiter oben in der Dieburger Bucht). Die Spanne der kalibrierten k_f -Werte bewegt sich im Wesentlichen zwischen $2 \cdot 10^{-5}$ und $2 \cdot 10^{-3}$ m/s mit höheren Durchlässigkeiten im Zentralbereich. Die in hellblau gehaltenen Flächen in Anlage 10 zeigen die im Modell berücksichtigten Stillgewässer inkl. Kiesgruben, die mit einem sehr hohen k_f -Wert von 1 m/s belegt sind.

Die Trennschichten wurden mit Durchlässigkeiten zwischen $1 \cdot 10^{-10}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s belegt. Berechnete Druckdifferenzen zwischen dem 1. und 2. Grundwasserleiter konnten lediglich anhand weniger vorhandener Messwerte verifiziert werden. Im Bereich der Brunnen Zellhausen ist die Trennwirkung des Unteren Tons anhand mehrerer Messstellen nachgewiesen. Im Bereich der Brunnen Seligenstadt liegt eine Schwächung des Unteren Tons vor. Dies konnte anhand eines

Pumpversuchs nachgewiesen werden. Die Durchlässigkeiten des Unteren Tons wurden entsprechend innerhalb der Kalibrierung angepasst.

5.3.3 Ergebnisse der instationären Modellkalibrierung

Für die Gegenüberstellung gerechneter und gemessener Ganglinien wurden Messstellen mit möglichst langjährigen Messreihen, gleichmäßig über das Modellgebiet verteilt, ausgewählt. Es wurden nur Messstellen berücksichtigt, die anhand vorhandener Ausbauzeichnungen und Bohrprofile eindeutig einem Grundwasserleiter (dem 1. Grundwasserleiter, ZWO-11-107 dem 2. Grundwasserleiter) zuordnenbar waren. Insgesamt wurden bei der instationären Kalibrierung Grundwasserstandsganglinien an ca. 170 Messstellen im 1. Grundwasserleiter berücksichtigt. Diese beinhalten sowohl Landesmessstellen als auch Messstellen der Betreiber ZVG und ZWO.

Anlage 12.1 zeigt für das Kalibrierergebnis eine Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Ganglinien an für das Modellgebiet charakteristischen Messstellen. Die Lage der Messstellen ist in **Anlage 12.2** verzeichnet. Die Dynamik der Grundwasserstandsänderungen an den Messstellen wird in unterschiedlichem Maße von verschiedenen Einflüssen (Nähe zu Förderbrunnen, Wechselwirkung mit den Fließgewässern, Nähe zu den Modellrändern sowie Grundwasserneubildung) geprägt. Die Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten ist sowohl im Hinblick auf das absolute Wasserstandsniveau als auch auf die zeitliche Dynamik der Grundwasserstandsänderungen überwiegend gut. Die im Anfang des Simulationszeitraumes erkennbaren Unterschiede zwischen Messwert und Rechenwert können auf die Anfangswertproblematik der numerischen Berechnung zurückgeführt werden.

Nennenswerte Unterschiede zeigten sich an einigen Messstellen anhand sinkender berechneter Grundwasserstände ab dem Jahr 2013, die in den gemessenen Ganglinien nicht auftraten. Auch konnte insbesondere im Bereich der Brunnen des ZWO die Dynamik der gemessenen Grundwasserstände nicht identisch abgebildet werden, da keine durchgängigen und plausiblen monatlichen Förderdaten der Einzelbrunnen vorlagen. Dies trifft insbesondere auf den Zeitraum 2009 - 2015 zu. Zeitlich hoch aufgelöste Grundwasserstandsdaten zeigen zudem, dass die Grundwasserstände einiger Messstellen unter der Deckschicht luftdruckbeeinflusst sind.

Anlage 13.1 zeigt berechnete Grundwassergleichen und vorhandene Messwerte im 1. Grundwasserleiter zu einem Zeitpunkt hoher Grundwasserstände (April 2003). **Anlage 13.2** zeigt berechnete Grundwassergleichen und vorhandene Messwerte im 1. Grundwasserleiter zu einem Zeitpunkt niedriger Grundwasserstände (November 2018). Zu beiden Zeitpunkten ist eine gute Übereinstimmung des berechneten mit dem gemessenen Grundwasserstandsniveau im gesamten Modellgebiet gegeben.

5.4 Modellgüte und Sensitivitätsanalyse

5.4.1 Modellgüte

Zur weiteren Überprüfung der Modellgüte wurde für die stationäre Modellkalibrierung eine statistische Auswertung der Gegenüberstellung gemessener und gerechneter Werte ohne räumlichen Bezug durchgeführt. Der entsprechende räumliche Bezug ist in Kap. 5.2.2 und Anlage 9 gegeben. Die statistische Auswertung dient auch als Ausgangspunkt der Sensitivitätsanalyse der kalibrierten Parameter. Abb. 17 stellt in einem Streudiagramm gemessene und berechnete Grundwasserstände im 1. Grundwasserleiter für Oktober 2013 zusammen. Für das gesamte Modellgebiet wurden für den stationären Kalibrierzeitpunkt 253 Grundwassermessstellen berücksichtigt. Aufgrund des hohen Gradienten der Grundwasserstände im Bereich Münster wurden die Grundwassermessstellen in diesem Bereich mit Grundwasserständen > 130 müNN auch zur Vermeidung einer nicht verhältnismäßigen Gewichtung nicht berücksichtigt.

Die meisten Datenpunkte befinden sich nahe der Regressionsgeraden innerhalb einer Abweichung von $\pm 5\%$ der Messwertspanne. Die Messwertspanne entspricht 22,8 m bei Messwerten zwischen 102,6 und 125,4 müNN.

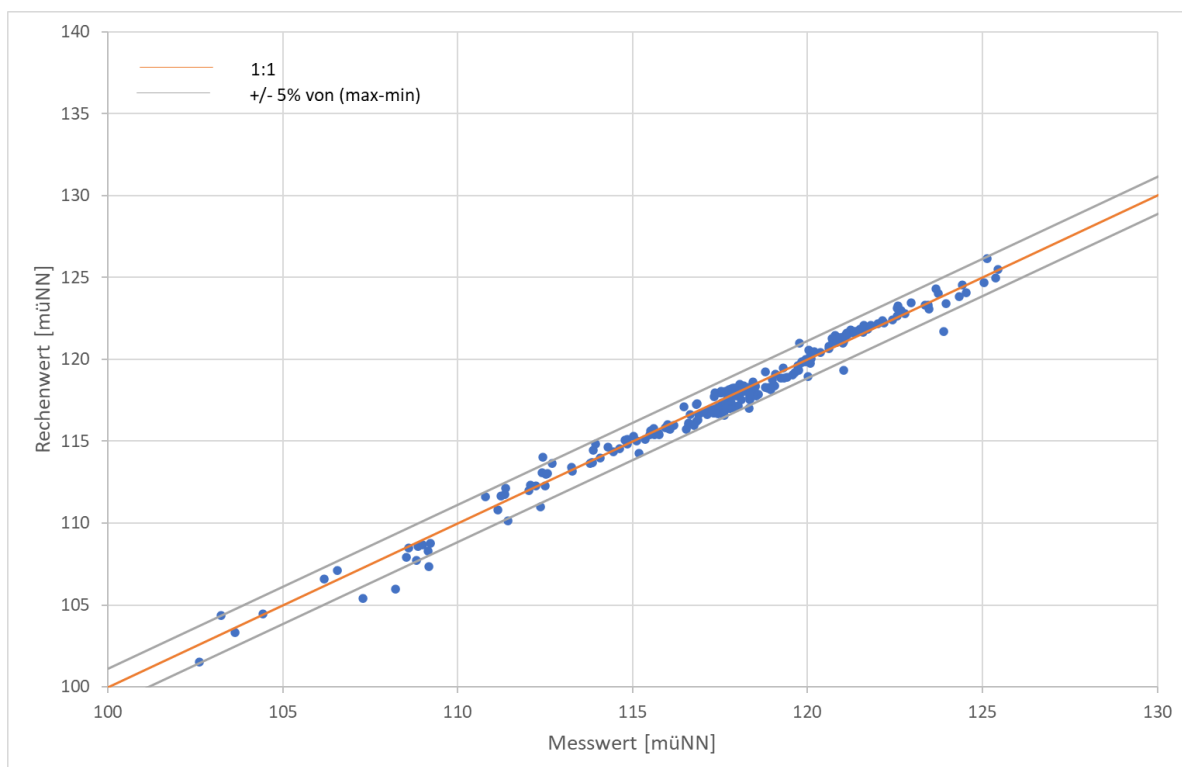


Abb. 17 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen im 1. GWL zum stationären Kalibrierzeitpunkt

Die Güte der Anpassung kann zusätzlich über die Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate (RMS) zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen beurteilt werden, die nach folgender Formel berechnet wird (Anderson & Woessner 1992):

$$RMS = \left[1/n \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0,5}$$

n = Anzahl der Messwerte

h_m = gemessener Grundwasserstand der Messstelle (müNN)

h_s = berechneter (simulierter) Grundwasserstand der Messstelle (müNN)

Der RMS-Wert sollte < 5% der maximalen Potentialdifferenz betragen (Spitz & Moreno 1996). Für die stationäre Modellkalibrierung liegt der RMS-Wert bei 0,56. Dies entspricht 2,5 % einer maximalen Potentialdifferenz von 22,8 m (bei Messwerten zwischen 102,6 und 125,4 müNN).

Die in der Kalibrierung ermittelten k_f -Werte werden als sehr vertrauenswürdig angesehen. Durch die zahlreichen Grundwasserentnahmen im Modellgebiet sind an vielen Stellen desselben die Flüsse bekannt, durch die mit den aus den beobachteten Grundwasserständen abgeleiteten Gradienten k_f -Werte eindeutig zu identifizieren sind. Vorteilhaft ist insgesamt ein relativ enges Messnetz im Untersuchungsgebiet und insbesondere eine Verdichtung im Bereich der Wasserwerke.

5.4.2 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss der Änderung einzelner kalibrierter Parameter auf das Modellergebnis systematisch überprüft. Hierbei werden die Modellparameter innerhalb festgelegter Wertebereiche variiert. Die Fehlerbetrachtung der Sensitivitätsanalyse wurde für das gesamte Modellgebiet anhand der zur Kalibrierung des stationären Modells verwendeten 253 Grundwassermessstellen durchgeführt. Als Maß der Sensitivität wird die Änderung des RMS-Wertes als Gütekriterium der Modellkalibrierung verwendet. Ausgehend vom Kalibrierzustand (100%) wurde jeder Parameter flächenhaft über das gesamte Modellgebiet einzeln und innerhalb sinnvoller Grenzen nach oben oder unten variiert und jeweils ein Rechenlauf durchgeführt. Tab. 3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

Tab. 3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

	Änderungsfaktor	RMS [m]
Kalibriertes Modell	100%	0,56
K _r -Wert 1. Grundwasserleiter	70%	0,66
	90%	0,56
	110%	0,60
	130%	0,70
K _r -Wert Trennschichten	90%	0,56
	110%	0,59
	200%	0,59
Leakagefaktor	70%	0,57
	90%	0,56
	110%	0,56
	130%	0,57
Randzustrom	70%	0,59
	90%	0,56
	110%	0,56
Grundwasserneubildung	70%	1,10
	90%	0,64
	110%	0,60

Ein Modellparameter gilt als besonders sensitiv auf das Modellergebnis, wenn aus geringfügigen Änderungen des Modellparameters vergleichsweise große Abweichungen vom Kalibrierzustand resultieren. Wenig sensitive Parameter können hingegen über große Wertebereiche variiert werden, ohne dass sich die Kalibriergüte merklich ändert. Erweisen sich mehrere Parameter als sehr sensitiv, ist die Eindeutigkeit des kalibrierten Parametersatzes nicht gewährleistet.

Für alle Variationen liegt der RMS-Wert < 5% der maximalen Potentialdifferenz. Die Sensitivität der Grundwasserneubildung ist am höchsten.

Insgesamt weist die Sensitivitätsanalyse keine erhöhte Fehleranfälligkeit des für das Modell ermittelten Parametersatzes auf.

5.4.3 Ausdehnung der Trennschichten

Insbesondere für die tieferen Trennschichten (Unterer Ton, Tiefer Zwischenhorizont) reicht die Dichte an Bohrungen nicht aus, um belastbar die Ausdehnung der Trennschichten abzugrenzen. Für deren plausible Abgrenzung sind weitere Informationen, insbesondere beobachtete Druckdifferenzen, heranzuziehen. Nachfolgend wird die Sensitivität einer unterschiedlichen räumlichen Abgrenzung exemplarisch für den Tiefen Zwischenhorizont auf Grundlage der Stellungnahme des HLNUGs vom 15. März 2021 (HLNUG 2021b) aufgezeigt.

Abb. 18 zeigt exemplarisch für den Tiefen Zwischenhorizont die ermittelte Verbreitung im Modell (Kreuzschraffur grün und weiß) und in weiß hinterlegt die Bereiche, die aus Sicht des HLNUG anhand von Bohrprofilen tatsächlich nachgewiesen werden können (HLNUG 2021b).

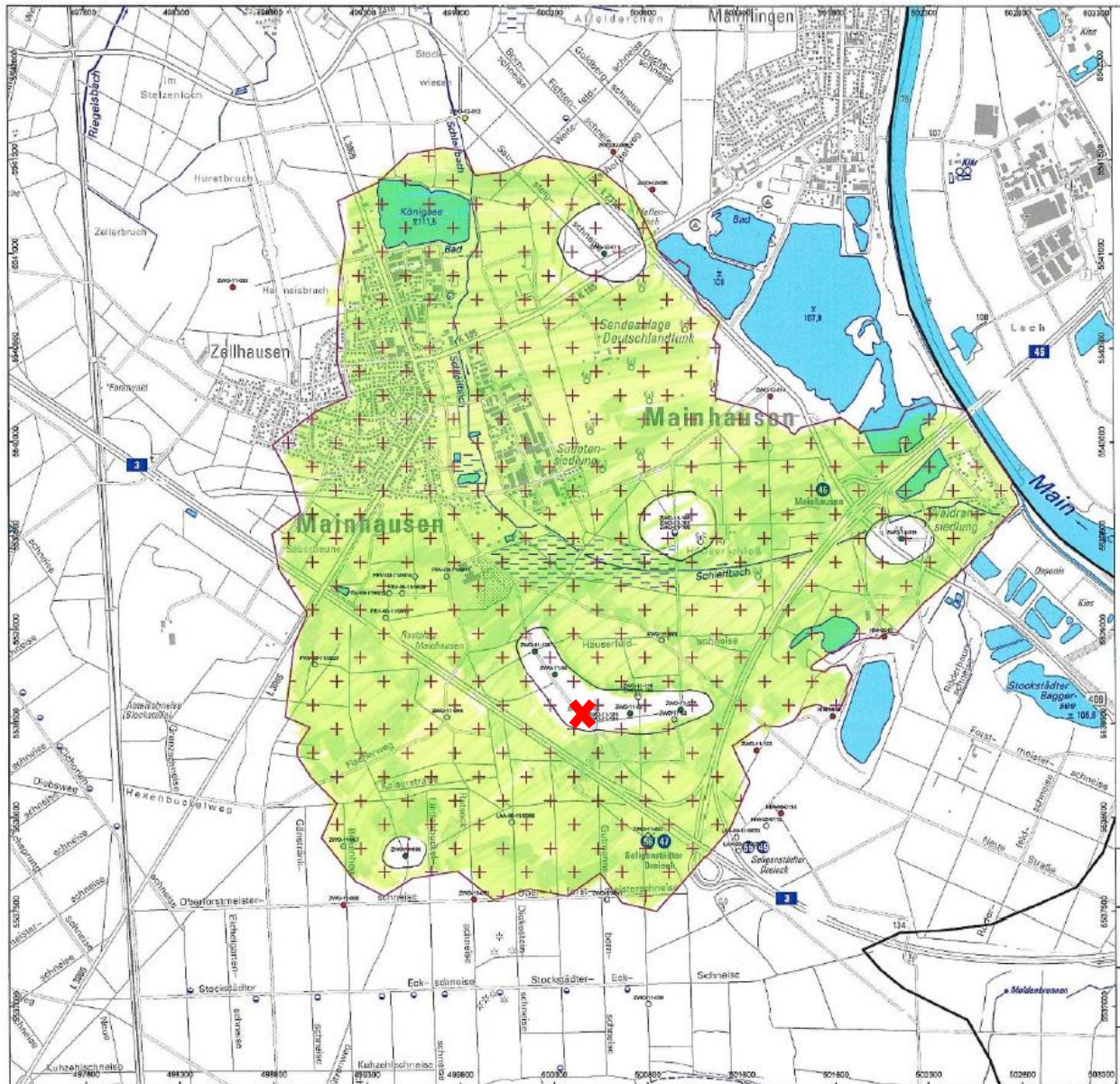


Abb. 18 Farbliche Differenzierung des geologischen Nachweises und der flächenhaften Ausbreitung im Grundwassermodell des Tiefen Zwischenhorizonts (Stellungnahme HLNUG vom 15. März 2021)

Mit einem roten Kreuz ist die Lage der Doppelmesssstelle ZWO-11-121/-124 gekennzeichnet, an der ein Druckunterschied zwischen dem 2. Grundwasserleiter oben und unten von ca. 1,50 m gemessen wird (Abb. 11). Dieser Druckunterschied ist mit einer auf die anhand von Bohrprofilen reduzierten Fläche des Tiefen Zwischenhorizonts nicht nachvollziehbar. Auch bei einer sehr

geringen Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s kann in Modellrechnungen nur eine Druckdifferenz von max. 0,03 m bewirkt werden.

Mit den implementierten Ausdehnungen der Trennschichten (Anlage 7.1) können gemessene Druckdifferenzen mit dem Modell gut nachgebildet werden. Die exakte Verbreitung der Trennschichten ist mit der Nachbildung der Druckdifferenzen nicht belegt. Bei vorliegenden neuen Bohrungen kann das Modell entsprechend kleinräumig angepasst werden.

5.5 Wassermengenbilanz

Tab. 4 gibt eine Übersicht über die Bilanzgrößen, die für die stationäre Modellkalibrierung, also mittlere klimatische Verhältnisse und Förderraten des Jahres 2013, ermittelt wurden.

Einer Grundwasserneubildung von 47 Mio. m³/a stehen Entnahmen von rund 30 Mio. m³/a (s.a. Tab. 1) gegenüber. Die Randzuströme inklusive der Zuströme aufgrund von Festpotentialen aus Randbedingungen summieren sich auf 11 Mio. m³/a, der Abstrom zum Main beträgt ca. 29 Mio. m³/a mit 17 Mio. m³/a im nördlichen Modellbereich und 12 Mio. m³/a im bayerischen südlichen Bereich. Innerhalb des Modellgebiets steht einer Infiltration aus den Fließgewässern in das Grundwasser von 14 Mio. m³/a eine Exfiltration von 13 Mio. m³/a entgegen. Eine lokale Verteilung der Wasserbilanzgrößen ist in **Anlage 13** dargestellt.

Tab. 4 Wasserbilanzgrößen bei mittleren Verhältnissen für das Jahr 2013

Positive Bilanzgrößen / Quellen [Mio. m ³ /a]		Negative Bilanzgrößen/ Senken [Mio. m ³ /a]	
Grundwasserneubildung	47,0	Entnahmen	29,6
Randzustrom	10,9	Abstrom Main	29,2
Infiltration Fließgewässer	14,2	Exfiltration Fließgewässer	13,3
SUMME	72,1	SUMME	72,1

Der numerische Fehler in der Modellbilanz liegt mit < 500 m³/a bei ca. 0,0007 %.

Tab. 5 gibt eine Übersicht über die Schwankungsbreiten innerhalb der Zeitschritte aus den Eingangs- und Berechnungsdaten der Wasserbilanzgrößen im Zeitraum 1987-2018. Die größte Schwankungsbreite ergibt sich für die Grundwasserneubildung, die in Einzelmonaten auch negativ ist. Die Schwankungen des Randzustroms ergeben sich maßgeblich aus dem Zustrom südlich von Großostheim. Der Zustrom an der Dieburger Bucht variiert +/- 1 % zum Bilanzwert unter mittleren Verhältnissen.

Tab. 5 Schwankungsbreiten der Wasserbilanzgrößen im Zeitraum 1987-2018

Positive Bilanzgrößen / Quellen [Mio. m ³ /Monat]		Negative Bilanzgrößen/ Senken [Mio. m ³ /Monat]	
Grundwasserneubildung	-2 - 10,8	Entnahmen	2,3 - 3,5
Randzustrom	0,7 - 1,1	Abstrom Main	0,7 - 6,1
Infiltration Fließgewässer	0,9 - 1,9	Exfiltration Fließgewässer	0,6 - 2,9

5.6 Prognosefähigkeit und Unsicherheiten

In den Langzeit-Kontinuumsimulationen wird in den instationären Modellrechnungen die Grundwasserbewirtschaftung seit 1987 nachvollzogen. Im Zeitraum der instationären Modellkalibrierung variieren die Modellrandbedingungen erheblich. Dies trifft insbesondere auf die Grundwasserneubildung mit Trockenperioden, Nassperioden und sehr trockenen Verhältnissen am Ende des Simulationszeitraums zu. Die instationäre Modellierung dieser sehr unterschiedlichen Systemzustände fördert auch die Identifizierung eindeutiger Parametersätze. Das zeitlich variable Niveau der beobachteten Grundwasserstände als maßgebliche Größe zur Modellkalibrierung wird sehr gut wiedergegeben.

Beim Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen sind mehrere Dinge zu beachten:

Eine gezielte Kalibrierung des schwebenden Grundwasserleiters erfolgte nicht. Hier liegen keine flächendeckenden Daten aus Grundwasserstandsmessungen vor.

Bohrungen und Messstellen, die auch die tieferen im Modell abgebildeten Horizonte erfassen, liegen nur in begrenzter Anzahl vor. Insbesondere in größeren Tiefen ist daher die hydrogeologische Schematisierung bereichsweise mit Unsicherheiten verbunden.

Entnahmemengen liegen nicht in allen Fällen in monatlicher und brunnenspezifischer Auflösung vor. Dies trifft insbesondere auf die Brunnen des ZWO zu. Die berechneten Grundwasserstände im Einflussbereich dieser Brunnen weisen entsprechend teilweise eine zu geringe Dynamik auf.

Zur Berechnung der In- und Exfiltration der Gewässer liegen nicht für alle Gewässer instationäre Daten vor. Sofern die Wasserspiegellagen mangels Daten nicht instationär behandelt werden konnten, entsprechen für die instationären Berechnungen verwendete Wasserspiegellagen den stationären Bedingungen.

Die Randzuströme werden sowohl mit aus den angrenzenden Einzugsgebieten bestimmten Zuflüssen als auch in kleineren Teilabschnitten als Festpotential abgebildet. In beiden Fällen werden die Randzuströme als stationär angesehen. Eine Unter- bzw. Überschätzung der Randzuströme bei instationären Betrachtungen ist somit möglich, wobei die Sensitivität der Randzuströme auf die Grundwasserstände im gesamten Modellbereich relativ niedrig ist.

Der Randabstrom zum Main ist mit der Definition instationärer Potentiale, die anhand gemessener Pegelstände interpoliert wurden als plausibel in Abhängigkeit der weiteren Bilanzglieder zu sehen.

In regionalen Grundwassermodellen ist die Grundwasserneubildung eine maßgebliche Bilanzgröße. Kernpunkt der Betrachtung ist hierbei die ungesättigte Bodenzone, da aus der Wechselbeziehung Boden/Vegetation mit dem übergeordneten Klimageschehen letztlich die effektive Grundwasserneubildung resultiert. Die Bestimmung der Grundwasserneubildung als obere Randbedingung für das Grundwassermodell Untermain basiert auf Daten zu Bodenaufbau und Landnutzung sowie auf regionalisierten Klimadaten auf Tageswertbasis. Unsicherheiten in der Bestimmung der Grundwasserneubildung ergeben sich insbesondere aus den verwendeten

Methoden der Regionalisierung und den definierten bodenphysikalischen Eigenschaften. Die als untere Randbedingung zur Bestimmung der Grundwasserneubildung gegebenen Potentiale bergen Unsicherheiten insbesondere in Bereichen, in denen oberhalb der Deckschicht ein schwebender Grundwasserleiter vorhanden ist.

Aus Gründen der Operationalität (u.a. Datenmenge und Datenverfügbarkeit) werden die Eingangsdatensätze in das Grundwassermodell als Monatsmittelwerte gebildet. Sehr dynamische Prozesse werden hierdurch in den Modellrechnungen nur gedämpft abgebildet. Auch die zeitliche Zuordnung kann hierdurch geringfügig beeinflusst sein.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das erstellte und kalibrierte Grundwassermodell die Dynamik der Grundwasserstände im Unterraingebiet im Betrachtungszeitraum sehr gut abbildet. Abweichungen vom gefundenen Parametersatz verringern die Übereinstimmung zwischen Beobachtungsdaten und Berechnungsergebnis (s.a. Tab. 3). Das Modell verhält sich in Trocken- wie auch Nassperioden robust und bildet somit eine gute Grundlage für die Prognose und Validierung zu Fragestellungen der Grundwasserbewirtschaftung im Unterraingebiet.

Brandt·Gerdes·Sitzmann
Umweltplanung GmbH

Darmstadt, den 19. Dezember 2022

6 Literatur

- AG Bodenkunde (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Nachdr., Hannover
- Anderson, Woessner (1992): Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. San Diego. 381 S.
- BGS UMWELT (2008): Basisdaten zum Wasserrechtsantrag der Brunnen Zellhausen des ZWO. Anhang 1 - Hydrogeologische Erkundung im Bereich der Brunnen Zellhausen des ZWO.
- BGS UMWELT (2013): Dokumentation Grundwassermodell Untermain.
- Bieske und Partner (1996): Auswertung der Pumpversuche an den Versuchsbrunnen 11.50, 11.51, 11.52 und 11.53 im Zellhausener Wald als Ergänzung des Wasserrechtsantrags vom 30.12.1991.
- Böke (1982): Gutachten des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Wasserwerks "Lange Schneise" des Zweckverbandes Wasserversorgung Stadt und Kreis Offenbach.
- Budde, H., Hoselmann, C., Radtke, G., Heggemann, H., Lehné, R. (2019): Geologische 3D-Modellierung in der Untermainebene. Jahresbericht des HLNUG. G1-W4. S. 193-201. Wiesbaden.
- ERM (2002): Wasserversorgungskonzept für das Verbandsgebiet des ZWO, Phase B, Materialband B: Grundwassermodellierung.
- Fritsche, H.-G., Hemfler, M., Kämmerer, D., Leßmann, B., Mittelbach, G., Peters, A., Pöschl, W., Rumohr, S., Schlösser-Kluger, I. (2003): Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). Geol. Jb. Hessen 130: 5-19, Wiesbaden.
- GGU (2008): Meßbericht zu den geoelektrischen Untersuchungen im Bereich Mainhausen Wassergewinnung Bongsche Tongrube. Untersuchungsdatum 05. und 06. März 2008
- Hessisches Landesamt für Geologie (1992 - Faksimile von 1922)): Geologische Karte von Hessen, Blatt 5919 Seligenstadt, 1:25000 (GK25), Wiesbaden
- Hessisches Landesamt für Geologie (o.J.): Geologische Karte von Hessen, Blatt 6019 Babenhausen, 1:25000 (GK25), Wiesbaden
- HLNUG (2017): Hydrogeologie von Hessen - Odenwald und Sprendlinger Horst. Grundwasser in Hessen, Heft 2. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden.
- HLNUG (2021): Geologie-Viewer.
<https://geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/geologie/index.html?lang=de>

- HLNUG (2021b): Wasserrechtsverfahren nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und dem Hessischen Wassergesetz (HWG), Hydrogeologische Stellungnahme vom 15. März 2021
- HLUG (2007): Geologische Übersichtskarte von Hessen 1:300.000, 5. überarbeitete, digitale Ausgabe.
- HLUG (2014): Hydrologisches Kartenwerk. Hessische Mainebene. Grundwasserhöhengleichen im Oktober 2013. HLUG. Dezernat Hydrogeologie und Grundwasser. Datengrundlage Landesgrundwasserdienst
- König, M., Becker, M., Diehl, A., Rosen, B., Rüber, O., Seidel, T., Schröder, S., Zimmermann, C. (2021): SPRING - Simulation of Processes in Groundwater. Benutzerhandbuch, SPRING-Version 6.1.x. delta h Ingenieurgesellschaft mbH
- Kristensen, Jensen (1975): A Model for Estimating Actual Evapotranspiration from Potential Evapotranspiration. Hydrology Research (1975)6(3):170-188.
- Lang (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern), Dissertation am Fachbereich Material- und Geowissenschaften, TU Darmstadt.
- Richter, J. (1997): Geologisch-hydrogeologisches Modell für das nördliche Dieburger Becken und Zusammenfassung des hydrogeologischen Kenntnisstandes. Bericht, 17 S., Wiesbaden (HLfB).
- Sevruk, B. (1986): Correction of precipitation measurements: Swiss experience, Züricher Geogr. Schriften, Zürich, Schweiz.
- Spitz, Moreno (1996): A practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. J. Wiley & Sons, Inc. New York, 461 S.
- Streit, Weinelt (1971): Geologische Karte von Bayern - Blatt Nr. 6020 Aschaffenburg.- Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- TGU (2002): Wasserschutzgebiet Grundwassererkundung Großwallstadt - Abschlußbericht.
- Unger (2006): Vermessungsdaten Rodau/ Biber