

Modelldokumentation Untermain Teilbereich AVG

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Veranlassung und Modelleinsatz | 4 |
| 2 | Untersuchungsgebiet | 4 |
| 2.1 | Räumliche Einordnung | 4 |
| 2.2 | Klimatische Verhältnisse | 4 |
| 3 | Geologische und hydrogeologische Bestandsaufnahme | 6 |
| 3.1 | Geologie | 6 |
| 3.2 | Hydrogeologie | 7 |
| 3.3 | Grundwasserverhältnisse | 8 |
| 4 | Modellaufbau | 9 |
| 4.1 | Abgrenzung und Diskretisierung des Teil-Modellraumes | 9 |
| 4.2 | Randbedingungen | 10 |
| 4.3 | Grundwasserentnahmen | 10 |
| 4.3.1 | Brunnen | 10 |
| 4.4 | Fließgewässer | 11 |
| 4.5 | Flächenhafte Grundwasserneubildung | 12 |
| 4.5.1 | Vorbemerkungen | 12 |
| 4.5.2 | Modellierung des Bodenwasserhaushalts | 13 |
| 4.5.3 | Abgebildete Prozesse und Eigenschaften | 13 |
| 4.5.4 | Niederschlag und potentielle Verdunstung | 14 |
| 4.5.5 | Böden und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone | 15 |
| 4.5.6 | Landnutzung | 16 |
| 4.5.7 | Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg | 16 |
| 4.5.8 | Tatsächliche Verdunstung von Landflächen | 16 |
| 4.5.9 | Ergebnisse | 17 |
| 5 | Stationäre Modellkalibrierung | 17 |
| 5.1 | Variation der Modellparameter | 18 |
| 5.2 | Ergebnisse der stationären Modellkalibrierung | 19 |
| 5.3 | Modellgüte und Unsicherheiten | 19 |
| 5.3.1 | Modellgüte | 19 |
| 5.3.2 | Sensitivitätsanalyse | 21 |
| 5.4 | Wassermengenbilanz | 22 |
| 6 | Literatur | 23 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------|---|----|
| Abb. 1 | Niederschlagssummen DWD-Messstation Schaafheim-Schlierbach | 5 |
| Abb. 2 | Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration DWD-Klimastation Schaafheim-Schlierbach | 6 |
| Abb. 3 | Langjährige Grundwasserstandsganglinien LBY Großostheim 115 | 8 |
| Abb. 4 | Prozesse des Bodenwasserhaushaltes | 14 |
| Abb. 5 | Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen im 1. GWL zum stationären Kalibrierzeitpunkt | 20 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------|---|----|
| Tab. 1 | Im Modell implementierte Grundwasserförderung der öffentlichen Trinkwasserversorgung im betrachteten Teilmodellgebiet für die stationäre Modellkalibrierung (Jahr 2013) in Mio. m ³ /a | 11 |
| Tab. 2 | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse | 21 |
| Tab. 3 | Wasserbilanzgrößen bei mittleren Verhältnissen für das Jahr 2013 | 22 |

Anlagenverzeichnis

| | |
|------------|---|
| Anlage 1.1 | Übersichtslageplan mit Brunnen |
| Anlage 1.2 | Übersichtslageplan Teilbereich |
| Anlage 2 | Bohransatzpunkte |
| Anlage 3 | Aquiferbasis |
| Anlage 4 | Modellrandbedingungen und Finite-Elemente-Netz |
| Anlage 5.1 | Klima |
| Anlage 5.2 | Boden |
| Anlage 5.3 | Landnutzung |
| Anlage 5.4 | Mittlere Grundwasserneubildung [mm/a] |
| Anlage 6 | Berechnete Grundwassergleichen und Messwerte für Oktober 2013 |
| Anlage 7 | Kalibrierte k_f -Werte |

1 Veranlassung und Modelleinsatz

Das Grundwassermodell „Untermain“ wurde konzipiert für die Bearbeitung von quantitativen Fragestellungen der regionalen Grundwasserbewirtschaftung. Das im Grundwassermodell abgebildete Gebiet deckt westlich des Mains den wasserwirtschaftlich relevanten Teil des hessischen Untermaingebietes und die angrenzenden bayerischen Flächen bis zum Main mit einer Gesamtmodellfläche von ca. 335 km² ab. **Anlage 1.1** zeigt einen Lageplan des gesamten Modellgebietes. Das Modell umfasst den Porengrundwasserleiter westlich des Mains.

Die folgende Modelldokumentation beschreibt in Absprache mit dem WWA Aschaffenburg hauptsächlich den südöstlichen Teil des Gesamtmodells Untermain zwischen der Gersprenz im Norden und Großwallstadt im Süden. Das Modell in seinem Gesamtgebiet ist in BGS Umwelt (2022) dokumentiert. Im Zuge der Wasserrechte der Aschaffener Versorgungs-GmbH (AVG) wurde der in dieser Dokumentation beschriebene Teilbereich anhand detaillierter Informationen stationär nachkalibriert. **Anlage 1.2** zeigt den für die Brunnen der AVG relevanten südöstlichen Teil des Modellgebietes.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Räumliche Einordnung

Das Modellgebiet befindet sich in der tektonischen Einheit des Hanauer Beckens, welches im Osten durch den Spessart, im Süden durch den Odenwald und im Westen durch den Sprendlinger Horst (Abgrenzung vom Oberrheingraben) eingegrenzt wird. 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.

Der für die Brunnen der AVG relevante südöstliche Teil des Modellgebietes umfasst das Großostheimer Becken. Die südliche/ westliche Modellgrenze verläuft hier entlang des Übergangs von der Mainniederung zum Buntsandstein im Odenwald.

2.2 Klimatische Verhältnisse

Das Klima im Bereich des Modellgebietes ist dem Klimabezirk Rhein-Main-Gebiet zuzurechnen, welcher dem größeren Klimaraum Südwestdeutschland untergeordnet ist. Südwestdeutschland liegt in der kühlgemäßigten Klimazone, im Übergangsbereich zwischen dem Seeklima Westeuropas und dem kontinentalem Klima Osteuropas. Aus der Lage in der Westwindzone der planetarischen Zirkulation resultieren ganzjährig vorherrschend westliche Winde. Mit diesen wird feuchte und unter dem Einfluss des Golfstroms für die Breitenlage verhältnismäßig milde Luft vom Atlantik zugeführt. Dieser ozeanische Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt,

sorgt einerseits für eine näherungsweise gleichmäßige Verteilung der Niederschläge im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr und andererseits für milde Winter und nicht übermäßig heiße Sommer.

Repräsentative Stationen mit langjährigen Messreihen sind die in der Untermainebene 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 (mittl. Jahresniederschlag 1987-2018 673 mm). Die in Bayern gelegene Niederschlagsstation des DWD Großostheim hat für den Messzeitraum 1991 – 2020 einen mittleren Jahresniederschlag von 645 mm aufgezeichnet. Abb. 1 zeigt die Jahresniederschlagssumme der Messstation Schaafheim-Schlierbach für den Zeitraum 1987 - 2018.

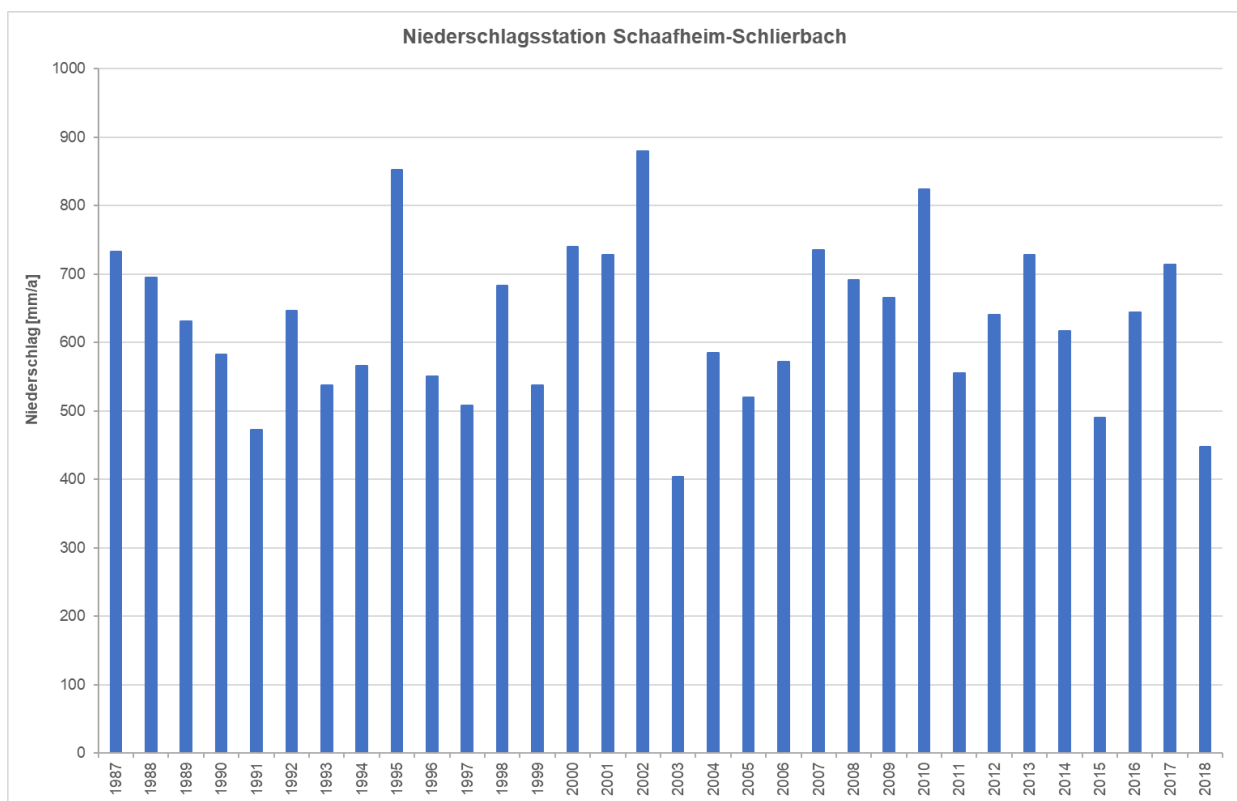


Abb. 1 Niederschlagssummen DWD-Messstation Schaafheim-Schlierbach

Daten zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration stellt die Klimastation Schaafheim-Schlierbach bereit. Die mittlere potentielle Evapotranspiration für die Jahre 1987-2018 beträgt 676 mm/a (Abb. 2).

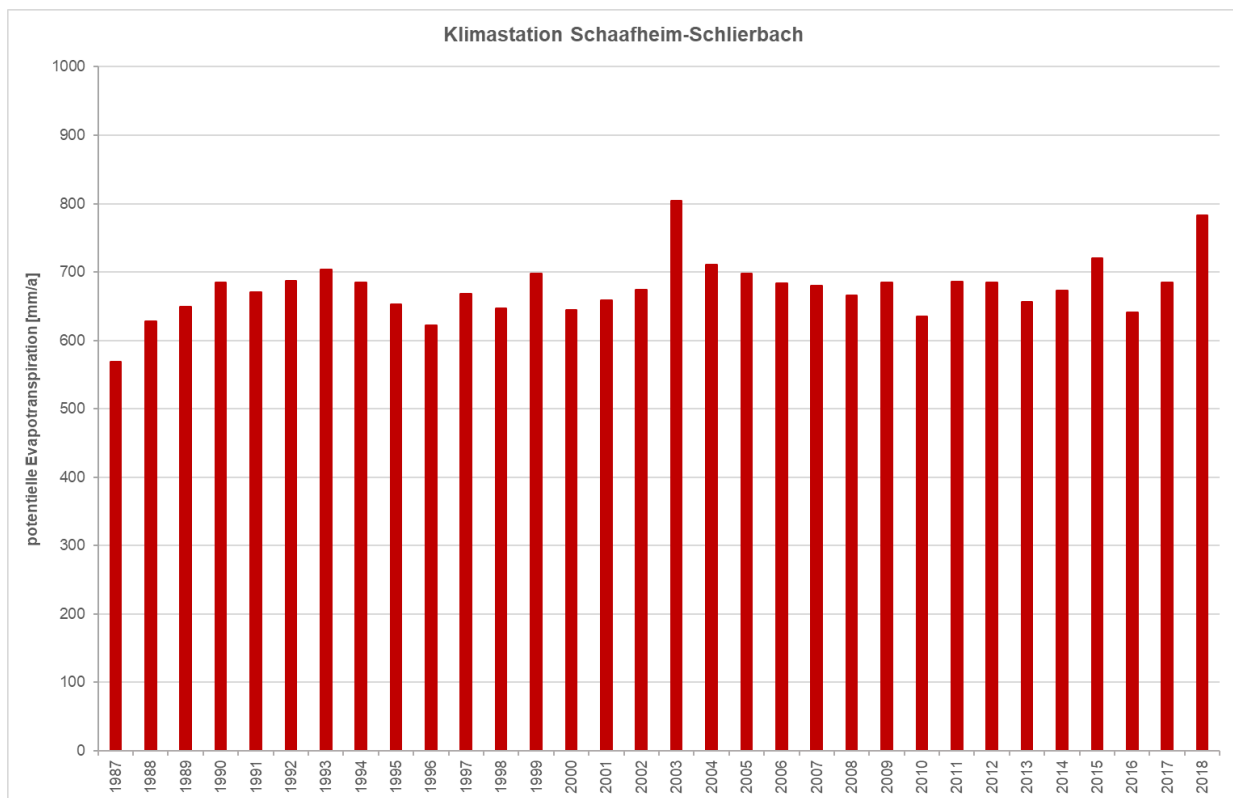


Abb. 2 Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration DWD-Klimastation Schaaheim-Schlierbach

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 verläuft zwischen den Kristallin- und Buntsandsteingebieten von Spessart und Odenwald entlang des Mains (Fritsche et al. 2003). 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 Profilschnitten dokumentiert (Lang 2007).

Der Grundwasserleiter im Modellgebiet 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. 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 Plio- und Pleistozän feinkörniger ausgebildet. Für die Grundwasserhydraulik ist die Verbreitung von feinkörnigen Trennschichten entscheidend, die den pleistozänen/pliozänen Grundwasserleiter in einzelne Stockwerke untergliedern können.

3.2 Hydrogeologie

Im für die Brunnen der AVG relevanten Modellbereich wurden insbesondere folgende Daten im Zuge der Überarbeitung des stationären Modells verwendet:

- Untergrundaufschlüsse (Bohrungen Bayern und Hessen, Bohrprofile von Brunnen und Grundwassermessstellen der AVG und des ZVG Dieburg)
- Gutachten der Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH (TGU) zum Mathematischen Grundwassermodell für die Grundwasserbewirtschaftung im Bereich der Gewinnungsanlagen der Stadtwerke Aschaffenburg (1. Fortschreibung 1992, 2. Fortschreibung 1997)
- Weitere Gutachten im Untersuchungsbereich:
 - Hybridseismische Untersuchungen im Großostheimer Becken, Aschaffenburg (K-UTEC 2022)
 - Antragsunterlagen auf Erteilung einer Erlaubnis zur Entnahme von Grundwasser aus dem Brunnen Kläranlage Bachgau (BCE 2023)
 - Hydrogeologisches Gutachten Neubau Schleuse Obernau (BCE 2019)
- Grundwasserstände an den Messstellen der AVG, Landesmessstellen (Bayern und Hessen) und an Messstellen des ZVG Dieburg (im Bereich nördlich von Großostheim)

Anlage 2 zeigt die Lage der vorliegenden ausgewerteten Bohrprofile. Im Bereich südlich von Großostheim wurden insbesondere zur Lokalisierung einer in mehreren Berichten genannten Rinne Bohrprofile mit Tiefen > 30 m ausgewertet. Hier wurden anhand der Bohrprofile keine hydraulisch wirksamen stockwerkstrennende Schichten nachgewiesen. Zwischen Schaaheim und Großostheim ist in den Bohrprofilen eine feinkörnige oberflächennahe Deckschicht mit Mächtigkeiten von bis zu 10 m nachgewiesen. Weitere durchgängige Trennschichten wurden im Untersuchungsgebiet anhand der vorhandenen Daten nicht nachgewiesen.

Die Basis des Grundwasserleiters (**Anlage 3**) wird durch Festgestein gebildet. Im bayerischen Modellbereich ist dies im Norden das kristalline Grundgebirge, im Bereich und südlich der AVG-Brunnen 8 und 9E der anstehende Buntsandstein des Odenwalds.

Die pliozänen und pleistozänen Sande und Kiese, die den Porengrundwasserleiter bilden, weisen anhand von Pumpversuchen und Körnungsanalysen ermittelte Durchlässigkeiten von $5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ m/s auf.

3.3 Grundwasserverhältnisse

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

Die Tiefstände des Grundwassers 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. 2007 bis 2014 bewegten sich die Grundwasserstände auf einem mittleren Niveau. Bis 2018 blieben die Grundwasserstände auf niedrigem, teilweise sinkendem Niveau. Abb. 3 zeigt hierzu exemplarisch die Grundwasserstandsganglinie der nordwestlich von Ringheim gelegenen bayerischen Landesmessstelle Großostheim 115.

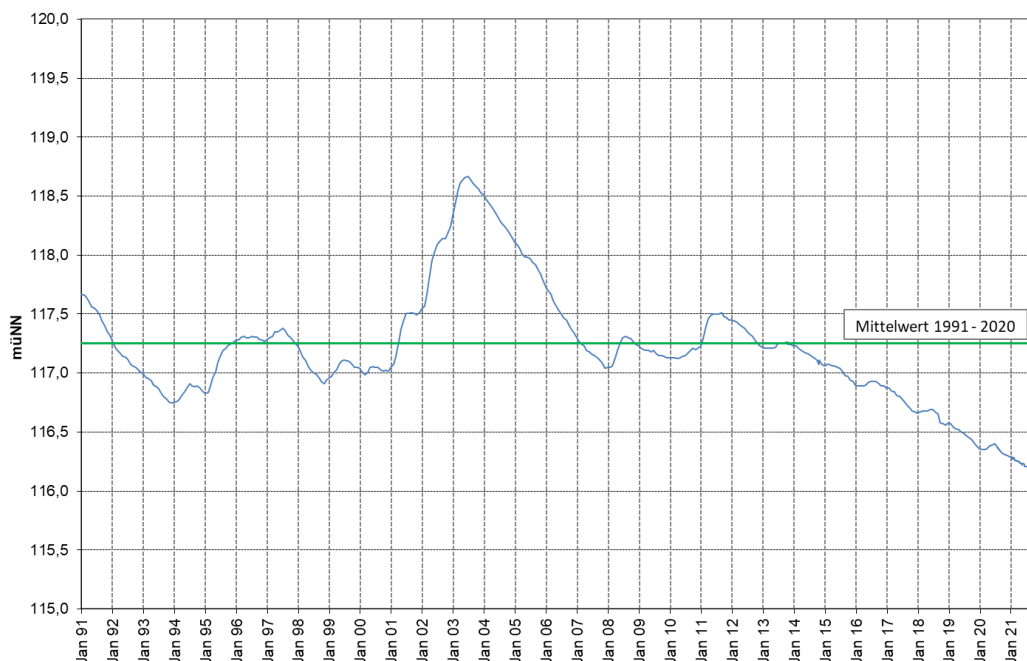


Abb. 3 Langjährige Grundwasserstandsganglinien LBY Großostheim 115

Im Untersuchungsgebiet ist der Main als Hauptvorfluter für die regionale Grundwasserströmung bestimmend.

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 Teil-Modellraumes

Die Modellstruktur resultiert primär aus der hydrogeologischen Schematisierung, dem Verlauf der Oberflächengewässer und der Lage der Brunnen maßgeblicher Entnehmer. Der betrachtete Teilraum des Grundwassermodells umfasst die Gewinnungsanlagen des Zweckverband Gruppenwasserwerk (ZVG) Dieburg, die Brunnen Großostheim (Ringheim und Pflaumheim), die Brunnen Großwallstadt sowie die Brunnen der AVG.

Das Modell verläuft in diesem Bereich entlang des Mains bis Kleinwallstadt mit westlicher Begrenzung durch den Buntsandstein im Odenwald. Das Modell umfasst ausschließlich den Lockergesteinsgrundwasserleiter westlich des Mains. Bei Stockstadt verläuft der Modellrand nicht entlang des Mains, sondern westlich eines Bereichs verzeichneter Kristallinaufstösse.

Die Basis des Modells entspricht der Basis des Pliozän. Im betrachteten Teilbereich wurde die Basis auf Grundlage vorliegender Bohrungen und Aufschlüssen sowie anhand vorliegender Berichte konstruiert (s. Kap. 3.2).

Anlage 4 zeigt das Finite-Elemente Netz im betrachteten Teilbereich. 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 der Entnahmen zur öffentlichen Wasserversorgung wurde das Netz lokal logarithmisch verfeinert, um die dort auftretenden steilen hydraulischen Gradienten adäquat abbilden zu können.

Das Netz des Gesamtmodells umfasst in horizontaler Richtung ca. 16.000 Knoten und rund 31.400 Elemente. Die Kantenlänge der Elemente liegt im Nahbereich der Brunnen bei ca. 20 m und im übrigen Modellgebiet bei maximal 400 m.

Insgesamt ist das FE-Netz des Grundwassermodells vertikal aus 15 Element- und 16 Knotenschichten aufgebaut. Die oberen Elementschichten entsprechen der ungesättigten Zone. Modellschicht 4 bildet beispielsweise die Deckschicht ab, die u.a. zwischen Schaaheim und Großostheim oberhalb des Grundwasserleiters auftritt. Schichten, in denen innerhalb des gesamten

Modellgebiets Trennhorizonte vorhanden sind, sind im betrachteten Teilgebiet, in dem es keine Trennschichten gibt, zusammengelegt.

4.2 Randbedingungen

Anlage 4 zeigt die Modellrandbedingungen des Teilgebietes sowie die implementierten Gewässer.

Der südliche/ westliche Rand wurde als Randzustrom aus dem Festgestein implementiert. Die Größenordnung der Zuströme wurde über vorhandene Informationen aus vorangegangenen Gutachten (s. Kap. 3.2) festgelegt und innerhalb der Kalibrierung leicht angepasst. Auf dem Abschnitt des Stockstädter Kristallinaufbruchs ist nur ein geringer Randzufluss implementiert.

Der Main bildet den östlichen Rand des Modells und ist mit einer Potentialrandbedingung abgebildet. Für die Pegel Krotzenburg, Mainflingen und Obernau wurden Daten der Wasserspiegellagen durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Aschaffenburg bereitgestellt. Weiterhin sind für die Staustufen die Wasserstände im Ober- und Unterwasser für Mittelwasser (MW) bekannt. Die Wasserspiegellagen bzw. Differenzen an den Staustufen wurden als Potentiale über die gesamte Länge des Mains interpoliert.

4.3 Grundwasserentnahmen

4.3.1 Brunnen

Grundwasserentnahmen im dargestellten Teilbereich des Grundwassermodells erfolgen neben der AVG zu einem großen Teil durch die Wasserversorger ZVG Dieburg (Brunnen XIV – XIX), Großostheim (Brunnen Ringheim und Pflaumheim) und Großwallstadt. Für die stationäre Modellkalibrierung (mittlere Verhältnisse) wurden die Jahres-Entnahmemengen der einzelnen Brunnen für das Referenzjahr 2013 implementiert (Tab. 1). Erläuterungen bzgl. des Referenzjahres folgen in Kap. 5.

Neben den Brunnen zur Trinkwasserversorgung werden in den Modellrechnungen private Brunnen mit Entnahmen $> 10.000 \text{ m}^3/\text{a}$ erfasst. Entnahmen zur landwirtschaftlichen Bewässerung der Beregnungsverbände wurden innerhalb der Berechnung der Grundwasserneubildung nach der Geisenheimer Methode zur Bewässerungssteuerung berücksichtigt.

Tab. 1 Im Modell implementierte Grundwasserförderung der öffentlichen Trinkwasserversorgung im betrachteten Teilmodellgebiet für die stationäre Modellkalibrierung (Jahr 2013) in Mio. m³/a

| Trinkwasserversorgung | |
|------------------------------|------|
| AVG | |
| Brunnen 1 | 0,13 |
| Brunnen 2 | 0,15 |
| Brunnen 3 | 0,18 |
| Brunnen 4E | 2,12 |
| Brunnen 8 | 1,58 |
| Brunnen 9 | 1,02 |
| Horizontalfilterbrunnen | 2,57 |
| ZVG Dieburg | |
| Brunnen XIV | 0,30 |
| Brunnen XV | 0,56 |
| Brunnen XVI | 0,67 |
| Brunnen XVII | 0,49 |
| Brunnen XVIII | 0,47 |
| Brunnen XIX | 0,00 |
| Großostheim | |
| Brunnen I – III (Ringheim) | 0,70 |
| Brunnen Pflaumheim | 0,19 |
| Großwallstadt | |
| Br. III | 0,13 |
| TiefBr. IV | 0,66 |

4.4 Fließgewässer

Die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und Grundwasser erfolgen im Wesentlichen durch Infiltration von Fließgewässer in das Grundwasser oder Exfiltration von Grundwasser in 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 [m²/a]
- LERA = polygonbezogener Leakagefaktor [m/a]
- l = Länge zwischen den Modellknoten [m]

A = Anteilig durchströmte Fläche der Sohle des Vorfluters [m²]
α = Leakagekoeffizient [1/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 Auswirkung 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 4 gekennzeichnet.

4.5 Flächenhafte Grundwasserneubildung

4.5.1 Vorbemerkungen

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.

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 berechneten 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.

Auf die Methodik der Bodenwasserhaushaltsberechnung als Langzeitkontinuumssimulation wird umfassend in Kämpf et al. (2023) eingegangen.

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 Unterraingebiet 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.

Für die Grundwasserneubildung der stationären Kalibrierungs- und Rechenläufe, die als obere Randbedingung verwendet wird, wurde ein Mittel aus den berechneten Tageswerten des Zeitraumes 1987 bis 2018 gebildet.

4.5.3 Abgebildete Prozesse und Eigenschaften

Abb. 4 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).

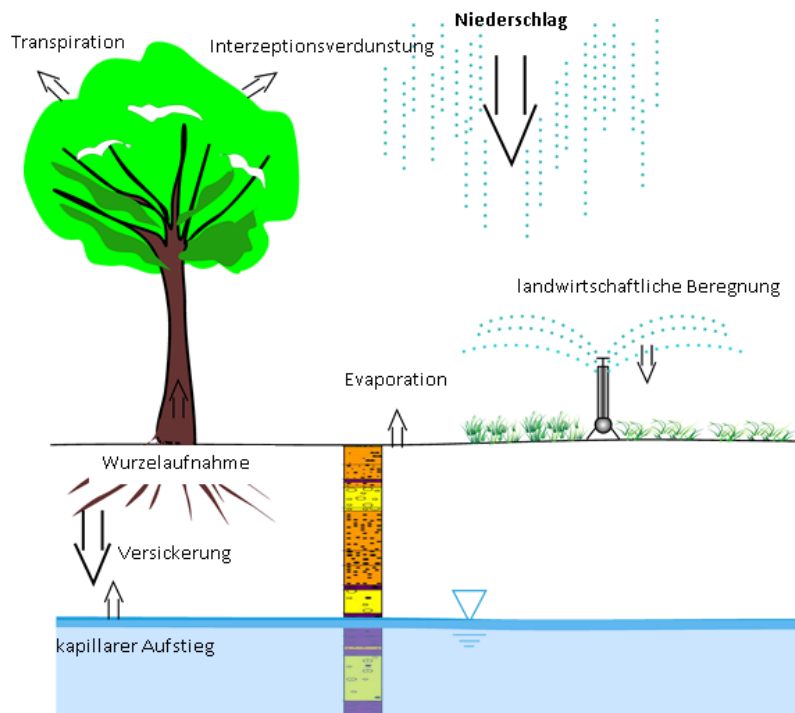


Abb. 4 Prozesse des Bodenwasserhaushaltes

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 vorhandener 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 Niederschlags-

korrektur 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 Ausgaberraster interpoliert. **Anlage 5.1** zeigt die flächenhafte Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagshöhe und die flächenhafte Verteilung der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstungshöhe für den Zeitraum 1987 - 2018 der klimatischen Eingabedaten für das Bodenwasserhaushaltsmodell. Sowohl Niederschlag als auch Verdunstung weisen eine vergleichsweise geringe räumliche Variabilität auf.

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 5.2**).

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 5.3**).

4.5.7 Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg

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

Die Wirkung von Stauhormonten 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) 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.

Im Bereich offener Wasserflächen entspricht die angenommene tatsächliche Verdunstung der potentiellen Verdunstung. Die Grundwasserneubildung ergibt sich hier aus der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus potentielle Verdunstung).

4.5.9 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 5.4** 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.

Für das südöstliche Teilgebiet (Großostheimer Becken, Mainniederung) beträgt die mittlere Grundwasserneubildung 145 mm/a.

5 Stationäre Modellkalibrierung

Nach Netzgenerierung und Parameterzuweisung wurde das Modell kalibriert. 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.

Das Gesamtmodell wurde sowohl stationär als auch instationär kalibriert. Im Zuge der Erstellung der wasserrechtlichen Antragsunterlagen für die AVG standen zusätzliche Unterlagen für den Bereich der AVG-Brunnen zur Verfügung (s. Kap. 3.2). Das Modell wurde entsprechend insbesondere im Bereich der AVG-Brunnen angepasst und nachkalibriert. Da für die wasserrechtlichen Antragsunterlagen der AVG stationäre Modellrechnungen durchgeführt wurden, wird im Folgenden Näheres zur stationären Modellkalibrierung beschrieben.

Die stationäre Modellkalibrierung erfolgte für eine an einem Stichtag gemessene Grundwasseroberfläche. 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 Untermain sind hauptsächlich Landesmessstellen (Hessen und Bayern), Messstellen des ZVG Dieburg, Messstellen des Zweckverband Wasserversorgung Stadt und Kreis Offenbach (ZWO) sowie Messstellen der AVG 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 Grundwasserhältnisse wurden an einem Großteil der Messstellen gebietsübergreifend im Oktober 2013 erreicht.

5.1 Variation der Modellparameter

Im Rahmen der stationären 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. Aufgrund 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 Ergebnisse der stationären Modellkalibrierung

Anlage 6 zeigt die Messwerte und die berechneten Grundwassergleichen im 1. Grundwasserleiter für den Kalibrierzeitpunkt Oktober 2013 (mittlere klimatische Verhältnisse) im für die Antragsunterlagen der AVG relevanten südöstlichen Modellbereich. Insbesondere im Nahbereich der AVG-Brunnen und im näheren Einzugsgebiet der Brunnen konnten die gemessenen Grundwasserstände mit dem stationären Modell gut nachgebildet werden.

Anlage 7 zeigt die kalibrierten k_f -Werte. Im betrachteten Teilbereich des Modells liegt die Spanne der kalibrierten k_f -Werte zwischen $2 \cdot 10^{-4}$ m/s im Westen und $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s östlich von Großostheim.

Der westliche Randzustrom beträgt im kalibrierten Modell zwischen Schaafheim und Pflaumheim 0,44 Mio. m³/a und zwischen Pflaumheim und Großwallstadt 3,3 Mio. m³/a. Im Bereich des Stockstädter Kristallinaufbruchs ist ein Randzufluss von 0,18 Mio. m³/a implementiert.

5.3 Modellgüte und Unsicherheiten

5.3.1 Modellgüte

Zur weiteren Überprüfung der Modellgüte wurde für die stationäre Modellkalibrierung eine statistische Auswertung der Gegenüberstellung gemessener und gerechneter Werte für das Gesamtmodell ohne räumlichen Bezug durchgeführt. Die statistische Auswertung dient auch als Ausgangspunkt der Sensitivitätsanalyse der kalibrierten Parameter. Abb. 5 stellt in einem Streudiagramm gemessene und berechnete Grundwasserstände im 1. Grundwasserleiter für Oktober 2013 für das gesamte Modellgebiet zusammen.

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.

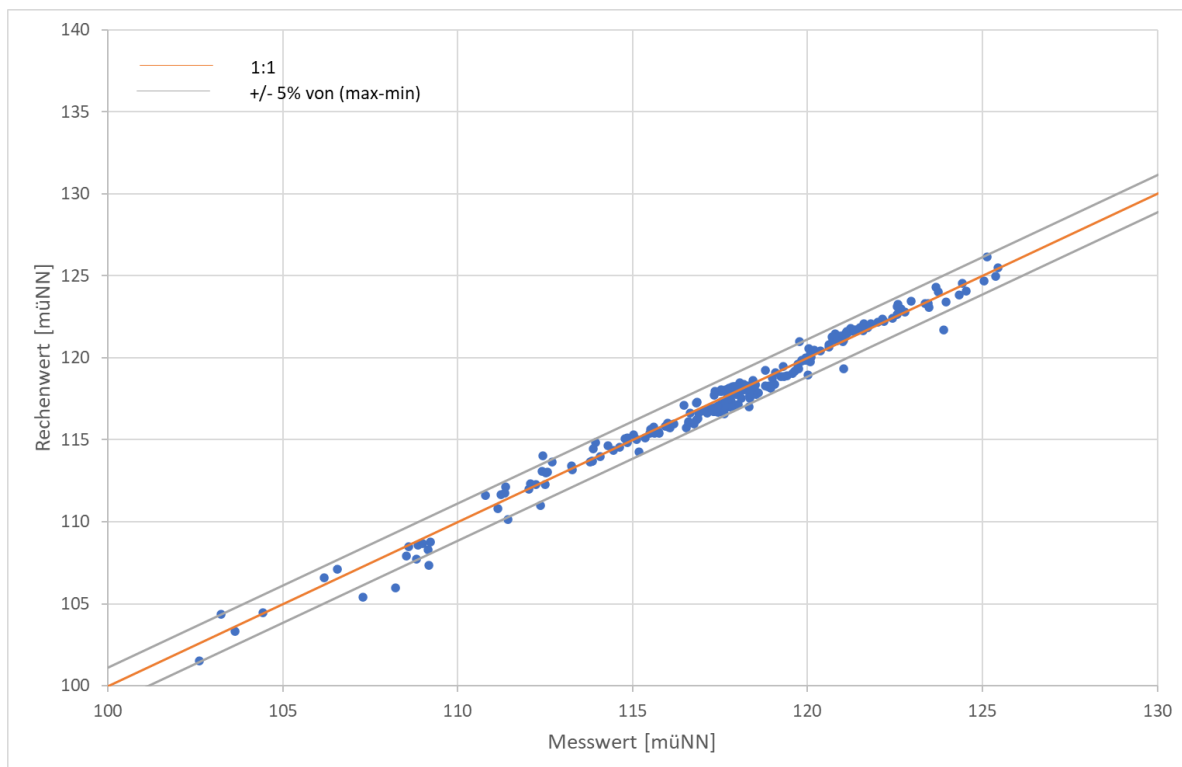


Abb. 5 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen im 1. GWL zum stationären Kalibrierzeitpunkt

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.

5.3.2 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 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. 2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

Tab. 2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

| | Änderungsfaktor | RMS [m] |
|---|-----------------|---------|
| Kalibriertes Modell | 100% | 0,56 |
| K _f -Wert 1. Grundwasserleiter | 70% | 0,66 |
| | 90% | 0,56 |
| | 110% | 0,60 |
| | 130% | 0,70 |
| K _f -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 Wassermengenbilanz

Die Wassermengenbilanz wird entsprechend der stationären Modellkalibrierung für das Gesamtmodell angegeben. Eine Wassermengenbilanz für das Einzugsgebiet der Brunnen der AVG ist im Erläuterungsbericht der wasserrechtlichen Antragsunterlagen enthalten.

Tab. 3 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 35 Mio. m³/a gegenüber. Neben den in Tab. 1 genannten Entnahmen im Teilgebiet der AVG sind dies maßgeblich Entnahmen des ZVG und des ZWO nördlich der Gersprenz. Die Randzuströme summieren sich auf ca. 11 Mio. m³/a, der Abstrom zum Main beträgt ca. 24 Mio. m³/a mit 17 Mio. m³/a im nördlichen Modellbereich und 7 Mio. m³/a im bayerischen südlichen Bereich. Innerhalb des Modellgebiets steht einer Infiltration aus den Fließgewässern in das Grundwasser von 15 Mio. m³/a eine Exfiltration von 14 Mio. m³/a entgegen.

Tab. 3 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 | 35,0 |
| Randzustrom | 10,9 | Abstrom Main | 24,1 |
| Infiltration Fließgewässer | 14,7 | Exfiltration Fließgewässer | 13,5 |
| SUMME | 72,6 | SUMME | 72,6 |

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

Brandt-Gerdes-Sitzmann
Umweltplanung GmbH

Darmstadt, den 6. März 2024



Dr.-Ing. M. Kämpf



Dr. rer. nat. H. Pflöschinger-Pfaff

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.
- BCE (2019): Hydrogeologisches Gutachten Neubau Schleuse Obernau. BjörnSEN Beratende Ingenieure. Juli 2019.
- BCE (2023): Markt Großostheim – Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis zur Entnahme von Grundwasser aus dem Brunnen Kläranlage Bachgau. Erläuterungsbericht. BjörnSEN Beratende Ingenieure. März 2023.
- BGS Umwelt (2022): Grundwassermodell Untermain – Dokumentation. Dezember 2022.
- 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 Babenhäusen, 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.
- HLUG (2007): Geologische Übersichtskarte von Hessen 1:300.000, 5. überarbeitete, digitale Ausgabe.
- Kämpf, M., Euler, C., Ergh, M., Pfletschinger-Pfaff, H., Gerdes, H. (2023): Prognoseinstrumentarium einer modellgestützten Bewirtschaftung intensiv genutzter Porengrundwasserleiter in Südhessen. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 28, 121–133.

- 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.
- K-UTEC (2022): Hybridseismische Untersuchungen im Großostheimer Becken, Aschaffenburg. K-UTEC AG Salt Technologies. August 2022.
- 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 (1992): Grundwasserbewirtschaftung im Bereich der Gewinnungsanlagen der Stadtwerke Aschaffenburg. Mathematisches Grundwassermodell. 1. Fortschreibung. Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH. Januar 1992.
- TGU (1997): Grundwasserbewirtschaftung im Bereich der Gewinnungsanlagen der Stadtwerke Aschaffenburg und des Marktes Großostheim. Mathematisches Grundwassermodell. 2. Fortschreibung. Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH. September 1997.
- TGU (2002): Wasserschutzgebiet Grundwassererkundung Großwallstadt - Abschlußbericht.