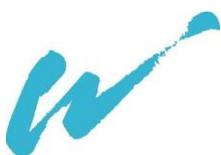
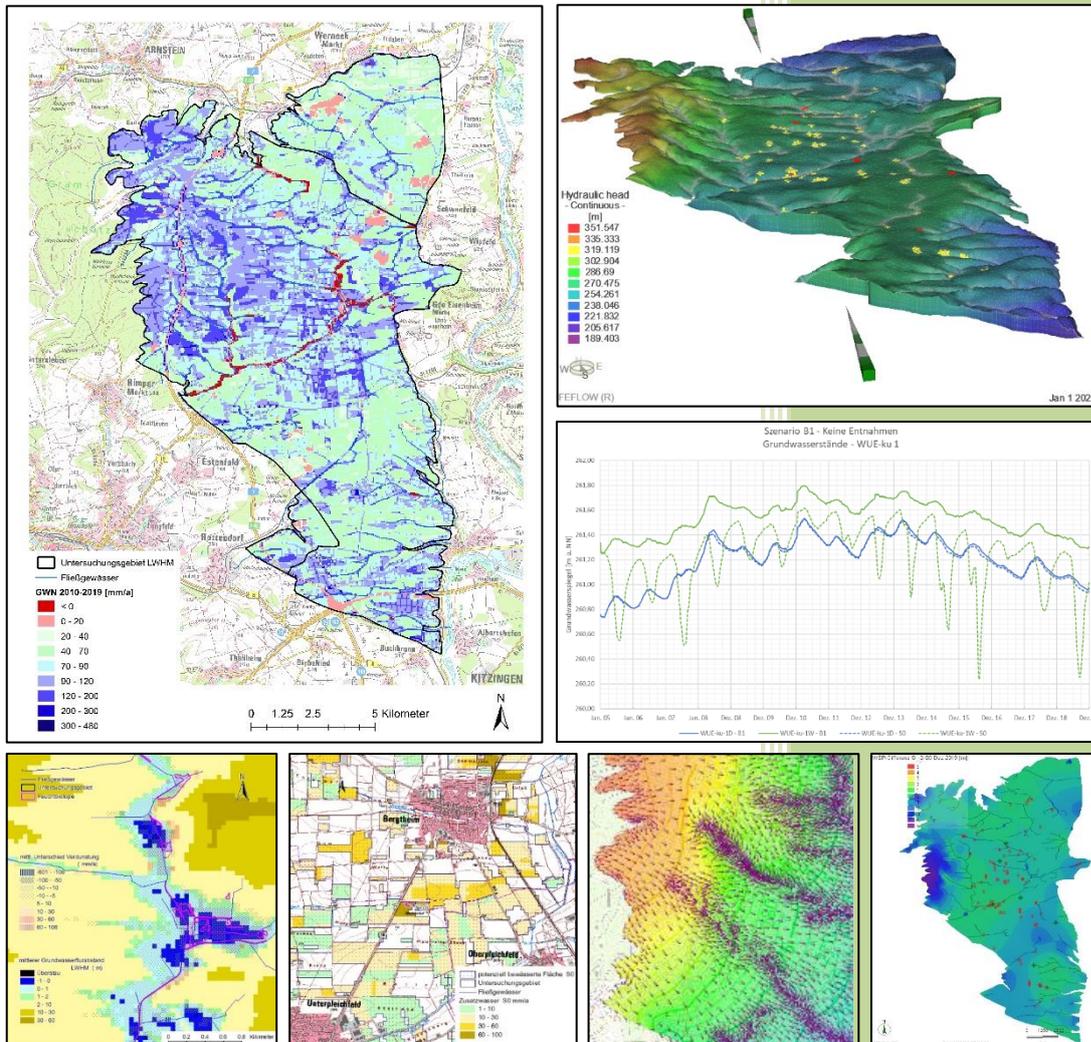




Abschlussbericht

(Stand 17.03.2022)

Ergebnisse des Projekts „Landschaftswasserhaushaltsmodell Bergtheimer Mulde“



Inhalt

1. Ziel des vorliegenden Abschlussberichts.....	3
2. Projektgestaltung und -ablauf.....	3
3. Modell- und Bilanzgebiet.....	5
4. Modellkonzept und verwendete Software.....	7
5. Aufbau und Parametrisierung des Modells.....	10
6. Kalibrierung.....	12
7. Sensitivitäts- und Szenarienanalyse.....	14
8. Modellierungsergebnisse.....	16
8.1 IST-Zustand.....	16
8.2 Auswirkung veränderter Klimaparameter.....	21
8.3 Auswirkung veränderter Grundwasserentnahmen.....	23
8.4 Einfluss der bewässerten Flächen.....	26
9. Grenzen der Modellierung.....	26
10. Die Ergebnisse im Kontext der Klimaentwicklung Unterfrankens.....	28
11. Zusammenfassung und Ausblick.....	30
12. Literaturverzeichnis.....	34

Abkürzungsverzeichnis

ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
AN	Auftragnehmer
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BAH	Büro für Angewandte Hydrologie
BIS	Bodeninformationssystem
DWD	Deutscher Wetterdienst
FeKa	Feldstückskarte
GIS	Geoinformationssystem
gsk	Gewässerstrukturkartierung
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermessstelle(n)
GWN	Grundwasserneubildung
INFO-Was	Fachanwendungspaket Grundwasser
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
kf	Hydraulische Leitfähigkeit
ku	Unterer Keuper
ku1	Unterer Keuper 1 (grundwasserhemmende hydrostratigraphische Einheit)
ku2	Unterer Keuper 2 (grundwasserhemmende hydrostratigraphische Einheit)
kuD	Grenzdolomit (Grundwasserleiter)
kuW	Werksandstein (Grundwasserleiter)
KWB	Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - Grasreferenzverdunstung)
LAI	Blattflächenindex
LfU	Landesamt für Umwelt
LWHM	Landschaftswasserhaushaltsmodell
nMAE	Normalisierter mittlerer absoluter Fehler
R ²	Determinationskoeffizient
RMSE	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme
RUF	Regierung von Unterfranken
StMUV	Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
TWV	Trinkwasserversorgung
WWA AB	Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg

1. Ziel des vorliegenden Abschlussberichts

Ziel dieses Berichts ist es die grundlegenden Schritte der Projektbearbeitung, den zentralen Aufbau des Landschaftswasserhaushaltsmodells (LWHM) Bergtheimer Mulde und dessen relevanteste Ergebnisse zu erläutern. Ein finales Fazit arbeitet die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen des Projekts heraus. Auf eine tiefgreifende Erläuterung der einzelnen Modellkomplexe wird verzichtet. Details sind im Abschlussbericht der beauftragten Ingenieurbüros *BAH – Büro für Angewandte Hydrologie (Berlin / München)* und *R & H Umwelt GmbH (Nürnberg)* (nachfolgend BAH und R&H Umwelt abgekürzt) nachzulesen, welcher die Etablierung des Modells und die Ergebnisse der einzelnen Simulationen detailliert beschreibt. Verweise auf die entsprechenden Abschnitte dieser ausführlichen Abhandlung sind im vorliegenden Text unter den Kapitelüberschriften aufgeführt. Nur einige wenige Formulierungen sind direkt übernommen. Für ein umfassendes Verständnis wird empfohlen den Bericht von *BAH und R&H Umwelt, 2021*, beim Lesen parallel verfügbar zu haben. Daher ist er als Anlage 1 beigelegt. Sind keine anderen Quellenangaben vorhanden, entstammen die Grafiken im Text den Berichten oder Präsentationen des Auftragnehmers (AN) oder sind aus den übermittelten Modelldaten generiert. Die im Rahmen der Modellerstellung genutzte Datengrundlage und deren Aufbereitung sowie die während der Projektlaufzeit erfolgten Messungen wurden bereits in Berichtsform an das Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) übermittelt (*WWA AB, 2021*) und sind diesem Abschlussbericht erneut als Anlage 2 beigelegt. Ein Zwischenbericht zum Projekt wurde am 23.02.2021 vorgelegt.

2. Projektgestaltung und -ablauf

Der Ablauf des dreijährigen Projekts ist schematisch in Tabelle 1 dargestellt. Die Bearbeitung begann mit der Besetzung der Projektstelle am 15.04.2019. Anschließend wurden in einem ersten Schritt alle verfügbaren und für die Etablierung des Modells notwendigen Daten ermittelt und aufgearbeitet. Zudem wurde ein auf die Modellregion, die Datenlage und die Fragestellung zugeschnittenes Modellkonzept entwickelt. Die Datenaufbereitung stellte neben dem Vergabeverfahren im ersten Projektjahr den aufwändigsten Arbeitsvorgang dar, insbesondere die Auswahl und Verarbeitung von Bohrdaten, Bodenprofilen, Wasserstandsganglinien und die Aufbereitung von InVeKoS-Daten. Während der Datensichtung wurde augenscheinlich, dass ein beträchtlicher Anteil der Bohrungen im Untersuchungsgebiet in Ausbau und Stratigraphie nur spärlich dokumentiert ist. Daher bedurfte es weiterer Vorarbeiten, welche schließlich in die Entwicklung der hydrogeologischen Modellvorstellung einfließen sollten. Mit diesen Vorarbeiten wurde der Regionalgeologe [REDACTED] aufgrund seiner langjährigen Erfahrung und Fachkenntnis zur Lithostratigraphie der Keuperhochfläche nördlich von Würzburg beauftragt.

Die Vergabe der Modellierungsleistung an einen geeigneten AN wurde noch im Herbst des ersten Projektjahres vorbereitet; im Februar 2020 erfolgte die Ausschreibung, bei der elf Ingenieurbüros und Universitäten berücksichtigt wurden. Zeitgleich dazu liefen Arbeiten zur Errichtung von drei neuen Abflussmessstellen in der Bergtheimer Mulde an den für die Region bedeutenden Vorflutern Pleichach (in der Gemeinde Estenfeld OT Mühlhausen) und Kürnach (in der Gemeinde Kürnach), sowie an dem abflussschwächeren Schernauer Bach (zwischen den Stadtteilen Schernau und Brück, Stadt Dettelbach, Landkreis Kitzingen). Ab März 2020 fanden dort monatlich und ereignisbezogen Abflussmessungen statt. Um eine Kalibrationsgrundlage für das Grundwassermodell zu schaffen folgte überdies im Oktober 2020 eine Stichtagsmessung an 109 Messstellen, Brunnen und Vorflutern.

Von den im Rahmen der Ausschreibung angefragten Büros antworteten bis 17.04.2020 fünf mit einem Angebot. Die Angebote wurden mittels der für das Vergabeverfahren entworfenen

Wertungsmatrix bewertet und mit dem bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) eingehend diskutiert. Das anhand fachlicher und finanzieller Kriterien identifizierte, wirtschaftlichste Angebot wurde von der Bietergemeinschaft BAH (direkter Vertragspartner) und R&H Umwelt erstellt. Das Projektteam hat langjährige Modellierungserfahrung, die durch aussagekräftige Referenzen bestätigt ist. Das Angebot bot neben der grundlegenden Landschaftswasserhaushaltsmodellierung sinnvolle Zusatzoptionen an, von welchen im Laufe der Modellerstellung nachträglich vier beauftragt wurden. Nach Vertragsabschluss Mitte Juni 2020 wurde die Zusammenarbeit mit den Ingenieurbüros aufgenommen und deren Arbeiten eng begleitet. Der dafür aufgestellte Projektplan ist in Anhang 1 einzusehen. Austausch zum aktuellen Stand der Modellierungsarbeiten und zu vorläufigen Ergebnissen fand kontinuierlich im Rahmen von zwei- bis dreimonatlichen Projekttreffen unter der Leitung des Wasserwirtschaftsamts Aschaffenburg (WWA AB) statt.

Die vervollständigte hydrogeologische Modellvorstellung wurde mit dem Zwischenbericht Ende November 2020 vorgelegt und in Rücksprache mit dem LfU geprüft. Anschließend erfolgte eine stationäre Modellierung der Bergheimer Mulde im ersten Quartal des zweiten Projektjahres. Zu dieser Zeit wurden bereits erste Projektergebnisse in Form von Präsentationen und einem Sachstandsbericht an die Regierung von Unterfranken (RUF) und das StMUV kommuniziert. Überdies wurde ein Bericht zu Recherche und Management der verwendeten Grundlagendaten verfasst und an die übergeordneten Behörden übermittelt.

Tabelle 1: Überblick zum Ablauf des Projekts LWHM Bergheimer Mulde am WWA AB

2019												
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez			
Vergabe und Begleitung der Modellierungsarbeiten							Vorbereitung der Vergabeunterlagen ...					
Weitere Aufgaben	Einarbeitung in das Projektgebiet; Entwicklung des Modellkonzepts					Datenrecherche und -aufbereitung u. a. mittels bayerischen Fachinformationssystemen						
Messungen						Planung der Abflussmessstellen						
2020												
Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
... und Wertungsmatrix	Ausschreibung	Angebotswertung; Vertragsabschluss		Projektkoordination und Unterstützung der Modellierungsarbeiten der Ingenieurbüros ...								Zwischenbericht
Zusammenarbeit mit dem Regionalgeologen								Vor- und Nachbereitung der Stichtagsmessung				
Bau und Messbeginn			Monatliche Abflussmessungen					Stichtagsmessung				
2021												
Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
... einschließlich der Organisation von Projekttreffen und der Prüfung von Ergebnissen										Abschlussbericht		
Sachstandsbericht u. Präsentation (StMUV, RUF)					Bericht zur Datengrundlage (StMUV)		Einarbeitung in die Modellsoftware					
2022												
Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Modellnutzung												
Abschlussbericht (StMUV, RUF)												

Die Ergebnisse der instationären Berechnung zur Entwicklung des Landschaftswasserhaushalts von 2005 - 2019 konnten im August 2021 fertiggestellt und dem WWA AB als Grundlage der zweiten Teilzahlung in Form von Karten und Diagrammen bereitgestellt werden. Zuvor war auf Nachforderung des WWA AB hin versucht worden durch eine Überarbeitung der instationären Kalibrierung des entstandenen Regionalmodells die Aussagekraft auch für die lokale Skala zu optimieren. Dieser Optimierungsversuch und die Bearbeitung der nach und nach beauftragten optionalen Positionen waren ursächlich für eine Verzögerung des Projektablaufs um rund vier Monate.

Abschließend fand die Berechnung der zuvor mit dem Auftraggeber abgestimmten Sensitivitäts- und Szenarienanalysen und die Aufbereitung der Ergebnisse statt. In Vorbereitung auf eine eigenständige Verwendung des LWHM am WWA AB wurde die nötige Software im Haus installiert und erprobt. Die Zusammenarbeit mit den beiden Ingenieurbüros konnte im Dezember 2021 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Modellerstellung und die finalen Simulationsergebnisse wurden von den beauftragten Ingenieurbüros im Beisein des WWA AB und des LfU (Ref. 92 und 94) präsentiert, der ausführliche Abschlussbericht *„Erstellung eines Landschaftswasserhaushaltsmodells für die Bergtheimer Mulde nördlich von Würzburg“* eingereicht und alle Modell- und GIS-Daten nachträglich übersendet. Mit einer Online-Schulung erfolgte zudem die Einführung in die Bedienung des LWHM.

Im ersten Quartal des Jahres 2022 ist fristgemäß der Abschluss des Projekts zu erwarten, mit der Nutzung des Modells und der Verfassung eines Abschlussberichts inkl. Vorstellung der Projektergebnisse als Präsentation.

3. Modell- und Bilanzgebiet

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 4, 5.3.4, 5.3.5, 5.4, 5.5.2)

Zu Beginn des Projekts bedurfte es, um den Rahmen für weitere Bearbeitungsschritte und für die Entwicklung der hydrogeologischen Modellvorstellung festzulegen, zunächst der Definition eines Untersuchungsraums. In vertikaler Richtung sollte dieser Raum von der Atmosphäre bis zur Unterkante des Unteren Keupers (ku) reichen, die Modellierung demnach das Klimageschehen, die Abflussbildung, die Interaktion von Boden und Vegetation, die Grundwasserneubildung (GWN) und letztlich die Grundwasserströmung umfassen. Durch die unruhige, stark wechselhafte Lithologie des ku mit sich auf engem Raum verzahnenden, häufig geringmächtigen, grundwasserleitenden und -hemmenden Schichten musste die Geologie stark vereinfacht dargestellt werden. Der ku sollte daher möglichst in seine vier hydrogeologischen Haupteinheiten unterteilt werden und die überlagernden Schichten bis zur Geländeoberkante zumindest vereinfacht dargestellt sein (um die Verzögerung der GWN abzubilden). Innerhalb der Erfurtformation des ku sind der Grenzdolomit (kuD) und Werksandstein (kuW) die in der Region vorwiegend für Entnahmen genutzten Grundwasserleiter (GWL). Die Tonstein-Gelbkalkschichten ku1 und ku2 stellen hingegen die trennenden Aquitarde dar.

In der horizontalen Ausdehnung des Untersuchungsgebiets war das gesamte, zusammenhängende System mit allen relevanten Fließsystemen zu erfassen und Abgrenzungen an eindeutigen Randbedingungen zu setzen. Dabei waren sowohl oberirdische als auch unterirdische Einzugsgebiete zu berücksichtigen. Hydrogeologisch und geomorphologisch sinnvoll erschien eine Orientierung am geologischen Ausstrich des ku, vorwiegend entlang der Höhenzüge Thüngersheimer Sattel im Westen und Volkacher Gewölbe im Osten. Wo dies bereichsweise nicht möglich war (vor allem an den nördlichen und südlichen Grenzen) wurden für die Ab-

grenzung Fließgewässerverläufe, Störungszonen, Grundwassergleichenpläne und oberirdische Einzugsgebietsgrenzen herangezogen. Bezüglich der Störungszonen war stets zu prüfen, welche hydraulische Wirkung diese aufweisen und ob sie tatsächlich als Grenze fungieren können. Im Südosten wurde das Betrachtungsgebiet über den Bereich der Bergtheimer Mulde hinweg ausgeweitet, da zu Projektbeginn keine Sicherheit bzgl. einer Grundwasserscheide zwischen den betreffenden Gebieten bestand.

Das zu Anfang vom WWA AB vorgeschlagene Untersuchungsgebiet wurde von den beauftragten Ingenieurbüros in leicht veränderter Form als Modellraum übernommen. Geringfügige Anpassungen erfolgten lediglich an den zwei zuvor definierten Unsicherheitsbereichen [Abbildung 1]. Der nördliche Unsicherheitsbereich von Essleben bis Etleben wurde komplett beibehalten, da hier ein bedeutsamer Abstrom über die Gähnheim-Esslebener Störungzone nach Norden in die Schweinfurter Mulde vermutet wird. Der südliche Unsicherheitsbereich konnte deutlich reduziert werden, aufgrund der Barrierewirkung der Rimpar-Kürnacher Störungzone und einer parallel dazu verlaufenden Grundwasserströmungsrichtung. Entlang der Grenzen des finalen Modellraums wurden für die Erstellung des numerischen Modells Nullstrom- und Überlauftrandbedingungen definiert. Durch die günstige Lage und sinnvolle Abgrenzung des Modellraums mussten keine oberirdischen oder unterirdischen Zuströme ins Modellgebiet hinein berücksichtigt werden, welche zumeist schwer abschätzbar sind.

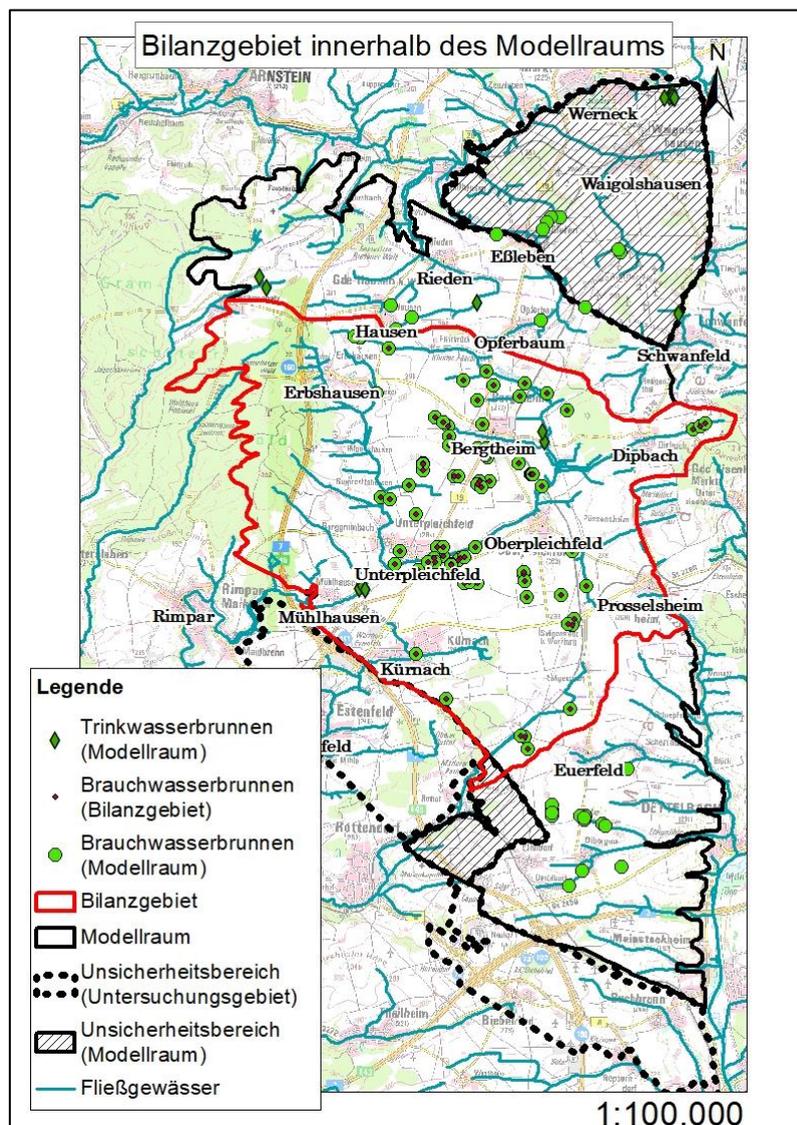


Abbildung 1: Bilanzgebiet als zentrales Aussagegebiet innerhalb des Modellraums

Im weiteren Projektfortschritt war zudem die Ausweisung eines kleineren Bilanzgebiets möglich, welches das zentrale Aussagegebiet für die Bergtheimer Mulde mit dem Großteil aller landwirtschaftlichen Brunnen und Beregnungsflächen darstellt. Dafür wurde das großräumige Modellgebiet nördlich an der Grenze des Pleichacheinzugsgebiets und südöstlich am Rottendorfer Sattel gekappt. Da in diesen Bereichen ober- und unterirdische Wasserscheiden verortet sind, war eine sinnvolle Abgrenzung für eine anschließende Bilanzierung des Teilraums möglich. Im Vergleich zum gesamten Modellraum sind beim Bilanzgebiet auch Bereiche mit geringer Datenverfügbarkeit ausgespart. Etwa wurden im Amtsbereich des WWA Bad Kissingen nicht alle entnahmestarken Brunnen integriert, die hochaufgelösten landwirtschaftlichen Flächennutzungsdaten nicht für die Unsicherheitsbereiche angewendet. Generell sind daher die für das Bilanzgebiet berechneten Ergebnisse als belastbarer anzusehen.

4. Modellkonzept und verwendete Software

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 3.1, 5.1, 5.5.1, 5.5.2.2, 5.7.2, 6.1, 6.2.1, 7.1, 7.2, 8.1)

Bei der Modellierung natürlicher Systeme gilt stets der Grundsatz „so einfach wie möglich, so genau wie nötig“. Das Modellkonzept ist unter anderem an der Datenlage und Fragestellung auszurichten (Guse, Pilz, Stoelzle, & Bormann, 2019). Die Zielstellung des Projekts „LWHM Bergtheimer Mulde“ erforderte eine tiefgründige Prozessbetrachtung und daher einen deterministischen Modellansatz, der das System mit Klima, Boden- und Grundwasserwasserhaushalt auf Grundlage fundamentaler, naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten umfassend darstellt [Abbildung 2]. Unter Verwendung des Modells sollte laut Projektantrag „das langfristig nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot ermittelt und die möglichen Auswirkungen der Entnahmen auf Quellen, oberirdische Gewässer und ggf. Feuchtfächen genauer erfasst werden. Ziel ist, mit diesem Modell künftig die Grundwasserentnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen auf Quellen, Oberflächengewässer und Feuchtfächen zu optimieren (Modellierung der Auswirkungen von Neuanträgen unter Berücksichtigung des Bestands als Grundlage für Auswahl und Bewertung zukünftiger Brunnenstandorte; Vorschläge zur Optimierung des Betriebs vorhandener Brunnen.“ (WWA AB, 2018, S. 1)

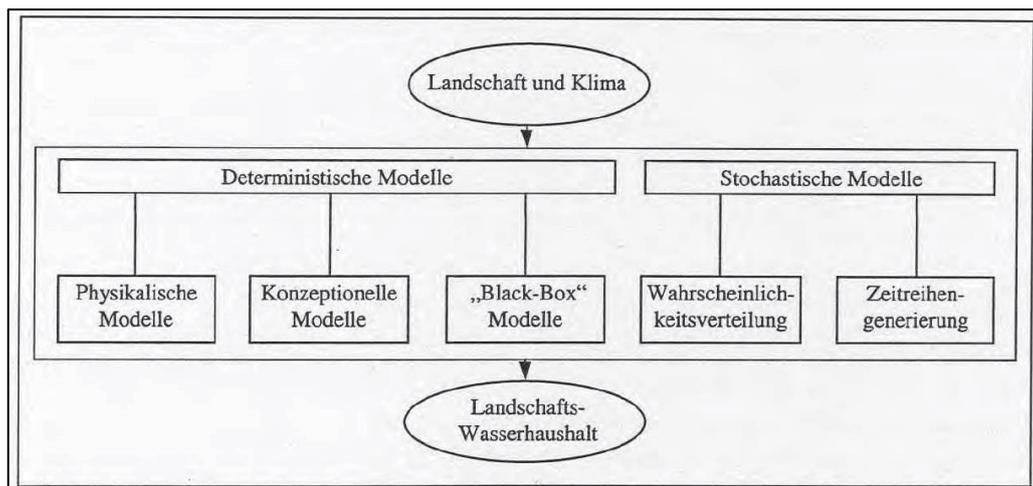


Abbildung 2: Klassifikation hydrogeologischer Modelle nach Kausalitäten, nach Nemeč 1993 und Singh 1995 (Herzog & Kunze, 1999)

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, erschien als technische Umsetzung die Kombination aus zwei eigenständigen, physikalisch oder konzeptionell-prozessbasierten Modellen

in bilateraler Kopplung am sinnvollsten; einem Bodenwasserhaushaltsmodell für die Simulation von Klima, Vegetationsentwicklung und Bodenzone und einem Grundwasserströmungsmodell.

Für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung wurde schließlich mit dem modular aufgebauten, hydrologischen Modellierungssystem ArcEGMO (Pfützner, 2002; Becker, 2002) unter Verwendung des ökohydrologischen Abflussbildungsmoduls PSCN (Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model; Klöcking, 2009) gearbeitet, wobei letzteres die Interaktion zwischen Vegetation und Bodenwasserhaushalt simuliert. Die Bewirtschaftung der Ackerflächen kann im Modell detailliert über die Definition von Fruchtfolgen beschrieben und das Zusatzwasser aus den Brunnen entsprechend auf den bewässerungswürdigen Kulturarten aufgebracht werden. Die Vegetationsdecke entwickelt sich über die Vegetationsperiode hinweg in Abhängigkeit von Pflanzenphysiologie, Standortfaktoren und Witterung. Die Verwendung dieses komplexen Wachstumsmodells ermöglicht die Berechnung des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs und den Vergleich mit den tatsächlichen, von Landwirten übermittelten Bewässerungsmengen.

Hinsichtlich der Abflussbildung werden mit ArcEGMO sowohl die Perkolation durch die Bodenzone als auch die Landoberflächen- und Zwischenabflüsse zum Vorfluter hin und schließlich der Abfluss im Fließgewässer berechnet. Abflussganglinien können für beliebige Beobachtungspunkte am Gewässer generiert werden. Jährliche, monatliche und tägliche Ausgaben sind zu allen Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten, ggf. auch differenziert als Summe für Teileinzugsgebiete möglich. Für definierte Zeitschritte oder als Mittelwert längerer Perioden sind diese Größen flächenhaft für den gesamten Modellraum darstellbar. Anstatt eine eigene, graphisch aufwändige Benutzeroberfläche vorzuhalten, stützt sich das System auf ein GIS-Modell mit entsprechendem Aufbau, welches über gängige GIS-Programme zu öffnen ist. Ein wesentlicher Vorteil von ArcEGMO besteht zudem in den enthaltenen Schnittstellen zur Kopplung mit diversen externen Programmen. Kopplungsroutinen für verschiedene Grundwassermodelle wurden von BAH in vorausgegangenen (Forschungs-)Projekten erfolgreich erprobt und lagen zu Beginn der Arbeiten bereits vor (BAH und gIR, 2011; Pfützner, Mey, Nützmann, & Scheffler, 2006; Mey, Albert, Hildebrand, & Pfützner, 2008; Monnikhoff, Koch, & Pfützner, 2012; Klöcking, et al., 2018).

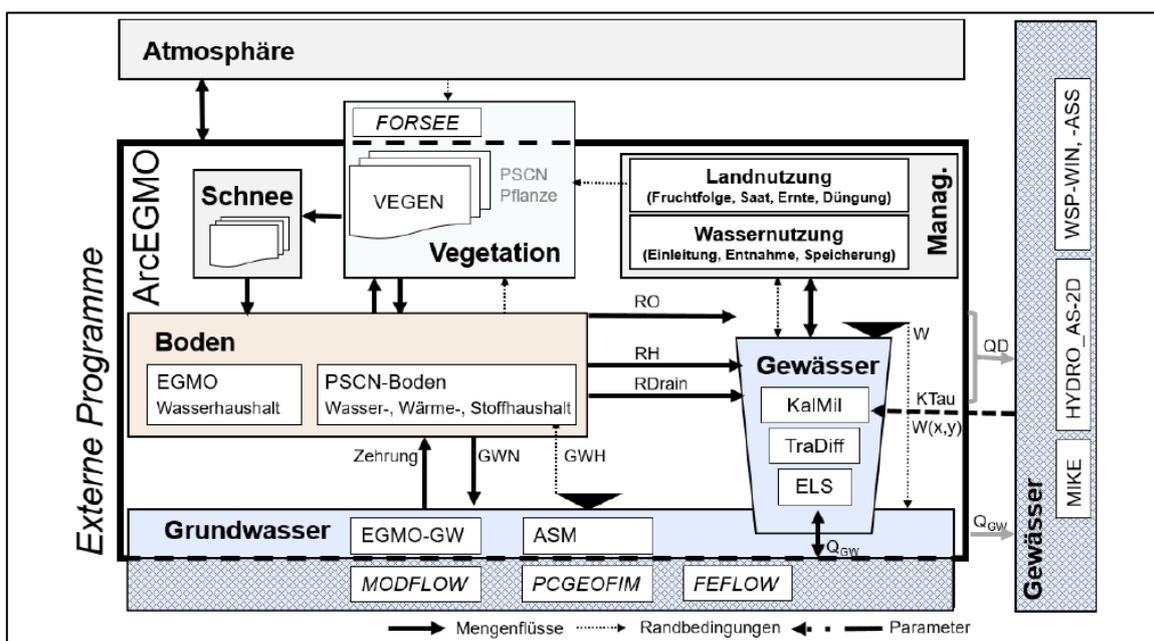


Abbildung 3: Modellkomponenten von ArcEGMO und Schnittstellen zu externen Programmen

Die Modellierung mit ArcEGMO + PSCN integriert letztendlich alle im Modellraum der Bergheimer Mulde wesentlichen Größen vom atmosphärischen Geschehen bis hin zur Sickerwasserbildung und die zentralen Einflussfaktoren auf den Gebietswasserhaushalt [Abbildung 3].

Das numerische Grundwassersmodell wurde mit der Software FEFLOW aufgebaut und berechnet nicht nur tägliche, monatliche und jährliche Grundwasserbilanzen sowie Zu- und Abströme in der Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Vorfluter, sondern gibt überdies Wasserstandszeitreihen für Brunnen, Messstellen und Beobachtungspunkte aus. Simulationsergebnisse können im Nachgang auf verschiedene Weise, auch im Vergleich mit tatsächlich gemessenen Werten, visualisiert werden, etwa über Querschnitte, Karten und Diagramme. Dies funktioniert auch für vorselektierte Teilbereich (z. B. für einen bestimmten GWL oder ein Teileinzugsgebiet). Das Programm vermag Werte unterschiedlicher Zeitschritte zu vergleichen und verrechnen. FEFLOW bietet zudem eine anwenderfreundliche Benutzeroberfläche [Abbildung 4].

Sowohl das Bodenwasserhaushaltsmodell als auch das Grundwassermodell arbeiten in täglicher Auflösung und modellieren die Jahre 2005 - 2019 mit einem Jahr Vorlaufzeit zum Einschwingen. Monatliche oder jährliche Eingangsdaten werden in tägliche Werte umgerechnet. Bei jedem Modelldurchlauf ist es möglich die Eingangsdaten und -parameter so zu variieren, dass verschiedene Klima-, Grundwasserentnahme- oder Landnutzungsszenarien umgesetzt und deren Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt analysiert werden können.

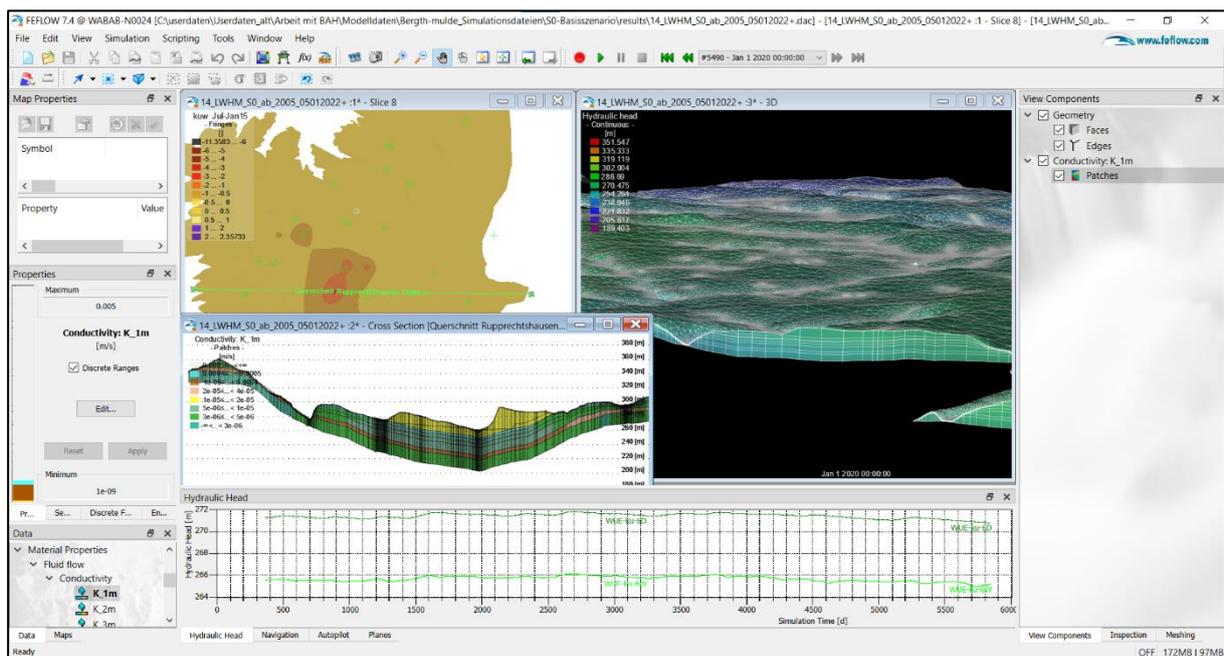


Abbildung 4: Screenshot des FEFLOW-Programms mit Wasserspiegeldifferenzen in der Sliceview (oben links), Wasserspiegelhöhen in der 3D-Ansicht (oben rechts), kf-Werten im Querprofil (mittig links) und Ganglinien der Messstelle WUE-ku-6 (unten)

Das Bodenwasserhaushaltsmodell arbeitet als rasterbasiertes Modell mit einer Gitterweite von 50 m, wobei jede Rasterzelle ein in seinen Eigenschaften homogenes Hydrotop darstellt. Dagegen weist das Grundwassermodell ein trianguläres Gitternetz mit prismatischen Elementen auf. Austauschgrößen für die Interaktion beider Modelle sind der Grundwasserstand (FEFLOW → ArcEGMO) und die Grundwasserneubildung (ArcEGMO → FEFLOW). Bei der Kopplung werden die dreieckigen Grundflächen des FEFLOW-Modells mit den quadratischen Elementflächen von ArcEGMO verschnitten und die Grundwasserstands- und GWN-Werte entsprechend ihres Flächenanteils an die überlagernde Einheit des jeweils anderen Modells weitergegeben. Der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser über die Gewässersohlen

wurde im Fall der Bergtheimer Mulde gänzlich über FEFLOW mit einer fixen Transferfläche berechnet (vereinfachte Darstellung), da für die Berechnung über eine Brunnenrandbedingung mit variabler Transferfläche in ArcEGMO umfassende Gewässerprofilaten erforderlich gewesen wären.

In den Modellergebnissen zeigen sich die Vorteile der bilateralen Kopplung beider Modelle: Die Abflüsse in kleineren Oberflächengewässern konnten durch das gekoppelte LWHM differenzierter wiedergegeben werden. In Bereichen mit hohen Grundwasserständen wurde durch die Rückkopplung mit FEFLOW eine deutlich höhere Verdunstungsleistung simuliert.

5. Aufbau und Parametrisierung des Modells

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 5.6, 5.7, 5.8, 6.2)

Ein deterministisches, physikalisch basiertes Modell, welches die Bewegung des Wassers in der Landschaft durch (Differential-)gleichungen beschreibt, verlangt eine aufwändige Parametrisierung. Meist können zur Simulation eines Prozesses modellintern mehrere Berechnungsansätze herangezogen werden, welche auf einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter basieren. Eine korrekte Wahl der Berechnungsansätze, eine sinnvolle Abbildung aller wesentlichen Strukturen und Einheiten in der Modellsoftware und eine realitätsnahe Parametrisierung sind essentiell für den Modellierungserfolg. Dies ist nur auf Grundlage einer repräsentativen Datenbasis sowie umfassender Kenntnis zum Landschaftsprozessgefüge zu gewährleisten.

Die Randbedingungen sind teils über die Simulationsdauer konstant, teils zeitvariabel einzustellen. Die zeitabhängigen Faktoren werden unter Verwendung von Messzeitreihen oder unter Zuhilfenahme von Literaturwerten über die Simulationsdauer hinweg variiert. Beispiele zu den im Modell abgebildeten Landschaftsbestandteilen und -prozessen sind in Tabelle 2 aufgeführt, zeitabhängige Faktoren blau schattiert.

Zumeist müssen die tatsächlichen Gegebenheiten in der Simulation aus modelltechnischen Gründen oder der Datenlage geschuldet abstrahiert und generalisiert werden. Beispielsweise werden auf den Ackerflächen der Bergtheimer Mulde zahlreiche Kulturarten (teilweise > 90 FNN-Nutzungscode pro Jahr) in verschiedenen Fruchtfolgen angebaut, bei gleichzeitig jährlich variierenden Schlaggrößen aufgrund von Pachtwechsel und Flächentausch. Diese räumlich und zeitlich unbeständigen Bedingungen waren so nicht modelltechnisch umsetzbar. Daher wurden die vorhandenen Informationen zu den angebauten Kulturarten (InVeKoS-Daten) auf geeignete Weise räumlich abstrahiert, regionaltypische Fruchtfolgen abgeleitet und die Felder dem Landwirt zugeordnet, der sie am längsten besaß.

Auch die Brauchwasserentnahmen konnten nur in reduzierter Form ins LWHM eingebunden werden. Aufgrund der hohen Anzahl landwirtschaftlicher Brunnen in der Region und der unterschiedlichen Datendichte zum Umfang der tatsächlichen Nutzung, musste hier ein Kompromiss gefunden werden. Ins Modell integriert wurden letztlich die Brauchwasserbrunnen jener Landwirte, die über Wasserrechte in der Höhe $\geq 5.000 \text{ m}^3/\text{a}$ verfügen. Zumindest für den Großteil des Modellraums, welcher im Amtsbereich des WWA AB liegt, konnten diese vollständig erfasst werden. In vielen Fällen kleinerer Garten-, Sportplatz- oder Hofbrunnen war zu wenig bzgl. Ausbau und Fördermenge dokumentiert. Der zusätzliche Aufwand für die Recherche und Aufbereitung dieser Informationen und die Umsetzung der „kleineren“ Brunnen im numerischen Modell hätte nicht im Verhältnis zur eventuell lokal geringfügig höheren Wiedergabetreue gestanden. Im Bilanzgebiet existieren etwa 55 dieser (teils erlaubnisfreien) Brunnen, für welche Entnahmemengen von insgesamt rund $50.000 \text{ m}^3/\text{a}$ genehmigt sind. Dies entspricht etwa 7 % der genehmigten Fördermengen entnahmestärkerer, landwirtschaftlicher Brunnen

im selben Gebiet. Wie viel tatsächlich aus den erlaubnisfreien Brunnen und Brunnen mit Wasserrechten $\leq 5.000 \text{ m}^3/\text{a}$ gefördert wird kann mit der vorhandenen Datenlage nicht nachvollzogen werden.

Weitere wertvolle Informationen, welche bei der Bodenwasserhaushaltsmodellierung berücksichtigt werden sollten, stellen Drainagepläne dar. Rohrdrainagen und Gräben haben einen beachtlichen Einfluss auf den Wasser- (und Stoff-)haushalt eines Gebiets, da über diese schnelle Abflusskomponenten generiert werden (Gramlich, et al., 2018). Für das Untersuchungsgebiet waren allerdings keine flächendeckenden Informationen zum Drainagesystem verfügbar. Zudem liegen in der Bergheimer Mulde häufig veraltete (teils 60 bis >100 Jahre alte) Rohrdrainagesysteme vor, weshalb Zweifel bestehen, ob das beschriebene Entwässerungssystem tatsächlich noch effektiv drainiert. Zum einen setzen sich die abflusswirksamen Elemente über die Jahre zu, zum anderen werden sie durch Bodenbearbeitung mit schwerem Gerät beschädigt. So bestätigten einige Landwirte, dass die Drainagen auf ihren Feldern nicht mehr funktionieren. Laut dem ursprünglichen Modellkonzept sollten die Drainagepläne zwar bei der Modellerstellung berücksichtigt werden, es zeigte sich jedoch bei der Abflussmodellierung, dass die Einarbeitung von Drainagen über eine einfache Grabenentwässerung hinaus nicht sinnvoll ist und den Gesamtabfluss unrealistisch erhöhen würden.

Tabelle 2: Abbildung verschiedener, für die Simulation des Wasserhaushalts relevanter Landschaftsbestandteile und -prozesse im Modell (blau = zeitvariabel; gelb = zeitkonstant)

Prozess / Einheit	Parameter / Eigenschaften (Auswahl)	Datengrundlage
Klima	Niederschlag; Temperatur; relative Feuchte; Windgeschwindigkeit; Globalstrahlung	Datenpool des DWD (Climate Data Center); Raster- und Stationswerte
Bewirtschaftung der Ackerflächen	Regionaltypische Fruchtfolgen; fruchtartenspezifische Werte (z. B. LAI; Wurzeltiefe; Zielfeuchte; Bewässerungsbedarf; Wachstumsfunktion; Saat- und Erntetermine; Wärmemengen bis zur Reife ...)	InVeKoS-Datensätze; Befragung von Landwirten; Literaturwerte
Grundwasserentnahmen und Bewässerungsgaben / Brunnen	Grundwasserförderung aus TWV- und Landwirtschaftsbrunnen; Berechnungsperioden Lage; Tiefe; Ausbau; Radius; Eigentümer und Verknüpfung mit dessen Feldstücken; Art der Brunnennutzung (Brauchwasser-/Berechnungsbrunnen)	Wassertagebücher (monatliche Aufzeichnungen); Bescheide; Bohrdokumentation (BIS); FeKa mit Information zu Eigentumsverhältnissen; Antragsunterlagen/Bescheid
Fließgewässer	Lage; Durchlässigkeit der Gewässersohle	Fließgewässernetz; gsk
Landnutzung	Räumliche Verteilung von Nutzungstypen mit Versiegelungs- und Bedeckungsgrad, Durchwurzelungstiefe, Interzeptionsspeicher und ggf. Kanalisationsart; räumliche Verteilung von Fruchtfolgen innerhalb des ackerbaulichen Gebiets	ALKIS/ATKIS-Datensatz; Biotopkartierung; InVeKoS-Datensätze; Literaturwerte
Gelände	Geländehöhe, -exposition und -gefälle	Digitales Geländemodell 5m-Raster
Boden	Horizontabfolgen und -mächtigkeiten; physikalische Bodeneigenschaften (z. B. Korngrößenverteilung; Lagerungsdichte; nutzbare Feldkapazität; Porosität; gesättigte Leitfähigkeit; Makroporosität ...); Drainage	Übersichtsbodenkarte; Bodenprofilaufnahmen; Bodenkundliche Kartieranleitung
Geologie	Schichtlagerung und Mächtigkeit hydrogeologischer Einheiten; Leakage; kf-Werte; Transmissivität und Porosität hydrogeologischer Schichten; Lage und hydraulische Wirkung von Störungszonen	Pumpversuche; Bohrdokumentation (BIS); Volumenmodell Muschelkalk-Maindreieck (LfU); div. Gutachten; Geologische Karte mit Erläuterung

Die genannten Beispiele sollen einen Eindruck davon vermitteln, wie vielschichtig die Datenverarbeitung und der Umgang mit Limitationen bei der Parametrisierung eines komplexen Landschaftswasserhaushaltsmodells sind. Die im Rahmen der Etablierung des Modells getroffenen Annahmen und nötigen Vereinfachungen müssen bei der Interpretation der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden. Beispielsweise können Grundwasserabsenkungen nicht standortgenau präzise reproduziert werden, wenn hydrogeologische Einheiten und deren hydraulische Eigenschaften vereinfacht abgebildet werden müssen. Ausführlicher sind die Grenzen der Modellierung in Kapitel 9 beschrieben.

Eine detaillierte Abhandlung zur Relevanz, Verfügbarkeit und Aufbereitung der verwendeten Daten ist bereits verfasst worden (*WWA AB, 2021*). Wie die Daten konkret bei der Gestaltung des LWHMs eingesetzt wurden, ist ausführlich im Abschlussbericht der beauftragten Ingenieurbüros erläutert (*BAH und R&H Umwelt, 2021*).

6. Kalibrierung

(*BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 5.9, 6.3, 6.4*)

Die Kalibrierung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden das Bodenwasserhaushalts- und das Grundwassermodell in vereinfachten Ansätzen getrennt voneinander auf ihre Wiedergabetreue hin untersucht und entsprechend nachjustiert. In einem zweiten Schritt fand die instationäre Kalibrierung des gekoppelten LWHM mit allen Modellkomponenten statt.

Üblicherweise wird beim Modellsystem ArcEGMO der konzeptionelle Modellteil für die laterale Abflusskonzentration mithilfe von repräsentativen, langjährig gemessenen Abflusszeitreihen kalibriert. Für die Fließgewässerabschnitte innerhalb des Modellraums waren solche Zeitreihen allerdings nicht verfügbar. Die in den Jahren 2020-2021 an den drei neu errichteten Oberflächenpegeln erfolgten Messungen fanden außerhalb des Simulationszeitraums statt und konnten somit nicht für eine Kalibrierung genutzt werden. Daher wurde eine einfache Plausibilisierung über den Vergleich der modellierten Abflussganglinien mit der Ganglinie des Pleichachpegels in Würzburg durchgeführt. Zudem war es möglich die mit ArcEGMO berechneten Sickerwassermengen den Ausgaben des bayernweiten Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW gegenüberzustellen, welche für den Zeitraum 2005 - 2018 vorlagen. Im Rahmen des ersten Funktionstests mit vereinfachtem Modellansatz zeigte sich, dass nachträglich gesättigte Leitfähigkeiten angepasst und fehlerhafte Leitbodenprofile korrigiert werden mussten, bis sich eine realistische Abflusskonzentration sowie plausible Grundwasserneubildungswerte für den Modellraum ergaben. Überdies wurden nachträglich für die Berechnung der Niederschläge Stationsdaten des Agrarmeteorologischen Dienstes hinzugefügt.

Für die Grundwassermodellierung wurde zunächst ein stationäres Modell etabliert, welches den mittleren Systemzustand simuliert. Dabei wurden als obere Randbedingung eine mittlere GWN und an den Brunnen die gemittelten Entnahmemengen der Jahre 2015 - 2017 angesetzt. Die Kalibrierung des noch ungekoppelten Modells erfolgte anhand der Grundwasserstandshöhen, welche während der Stichtagsmessung im Oktober 2020 nach Grundwasserleitern getrennt erhoben worden waren. Ferner wurde die Lage von Quellen in die Kalibrierung einbezogen. Diese konnte jedoch weniger gut wiedergegeben werden (Abweichungen von \varnothing 2 m). Zum einen ist zu den unzähligen Schichtquellen geringer bis mittlerer Schüttung im Modellraum wenig bekannt, darüber hinaus erschwert die topographische Auflösung des Modells die Darstellung der Quellen, insbesondere für die Hanglagen. Nach der Anpassung erzielte das stationäre Grundwassermodell jedoch eine im Durchschnitt sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, belegt durch die Statistik-

Gütemaße nMAE (1 %), RMSE (1 %) und R^2 (0,988). Mit 1 % Abweichung lag der mittlere Fehler deutlich unter dem gemäß DVGW-Merkblatt W 107 zulässigen Fehler von 5 % (DVGW, 2016). Auch ein Vergleich mit dem Grundwassergleichenplan des LfU für den Unteren Keuper nord-östlich von Würzburg bewies eine sehr gute Abbildung des generellen Strömungsbilds.

Für die Kalibrierung des instationären Modells wurden die Jahre 2012 – 2019 innerhalb des Simulationszeitraums herangezogen, abgestimmt auf die Verfügbarkeit und Qualität von Entnahme- und Wasserstandzeitreihen. Für diese Dauer lagen zu den meisten Brunnen kontinuierliche Aufzeichnungen der Grundwasserentnahme vor, für die Grundwassermessstellen (GWM) des Sondermessnetzes in der Bergtheimer Mulde waren Wasserstandszeitreihen der GWL kuW und kuD verfügbar. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde zunächst die Modellkopplung und anschließend die instationäre Kalibrierung durchgeführt. Dies bot den Vorteil, dass die klimatischen Einflüsse in beiden Modellteilen berücksichtigt werden konnten. Die Kalibrierung erfolgte anhand der Aufzeichnungen des Sondermessnetzes und der GWM WUE-MU-11 in Hausen, welche ebenfalls den ku erfasst.

Die durch das Modell berechneten Ganglinien an den Beobachtungspunkten wiesen im Vergleich mit den Messwerten eine relativ geringe saisonale Dynamik auf. Eine Verbesserungsoption bot eine erneute Bodenparametrisierung mit der Erhöhung von Leitfähigkeiten stark bindiger Bodenhorizonte. Die so verursachte Verstärkung der Sickerwasserbildung bei gleichzeitiger Verringerung von Oberflächen- und Zwischenabflüssen verbesserte die Gangliniendynamik an den beobachteten Messstellen. Innerhalb des Grundwassermodells wurden bei der Kalibrierung die Leckage in den Oberen Muschelkalk und die Leckage-Koeffizienten der Gewässersohlen sowie die Eigenschaften der Störungszonen angepasst. Die vertikalen und horizontalen Durchlässigkeiten (kf-Werte) der hydrogeologischen Einheiten wurden vorwiegend horizontweise homogen variiert. Nur in Teilbereichen (z. B. an den Muldenrändern und in Zentralbereichen mit verstärkter hydraulischer Verbindung zwischen den GWL) wurden die Leitfähigkeiten innerhalb einer Schicht variiert. Bei der instationären Kalibrierung wurden neben der manuellen Anpassung auch automatisierte Verfahren über das Programm FEPEST eingesetzt.

Die mehrjährige Dynamik der Grundwasserstände sowie Bilanzen für den Modellraum und ausreichend große Teilbereiche konnten anschließend gut erfasst werden. Das zeigte sich durch die Betrachtung der über ihren Mittelwert normalisierten Ganglinien (siehe *BAH und R&H Umwelt, 2021, Anlage 4.3*) und durch einen sehr geringen Bilanzfehler im Grundwassermodell. Allerdings waren die saisonalen und entnahmebedingten Schwankungen der Grundwasserstände an den Beobachtungspunkten nur tendenziell reproduzierbar. Die über den Modellraum unterschiedlich stark ausfallende Stockwerkstrennung stellte eine zusätzliche Herausforderung dar. Um das LWHM in diesen Punkten zu verbessern, wurden weitere Optimierungsmöglichkeiten geprüft und in diesem Zuge eine Verringerung der Transmissivitäten der GWL, eine Verringerung der Speicherkoeffizienten und eine lokale Zonierung der kf-Werte untersucht. Deutlich positive Auswirkungen auf das Gesamtergebnis waren nur durch eine lokale Anpassung der kf-Werte zu erzielen [Abbildung 5]. Eine in

Teilbereichen verringerte Durchlässigkeit verstärkte an den Beobachtungspunkten sowohl die entnahmebedingten Grundwasserstandsabsenkungen als auch die Stockwerkstrennung.

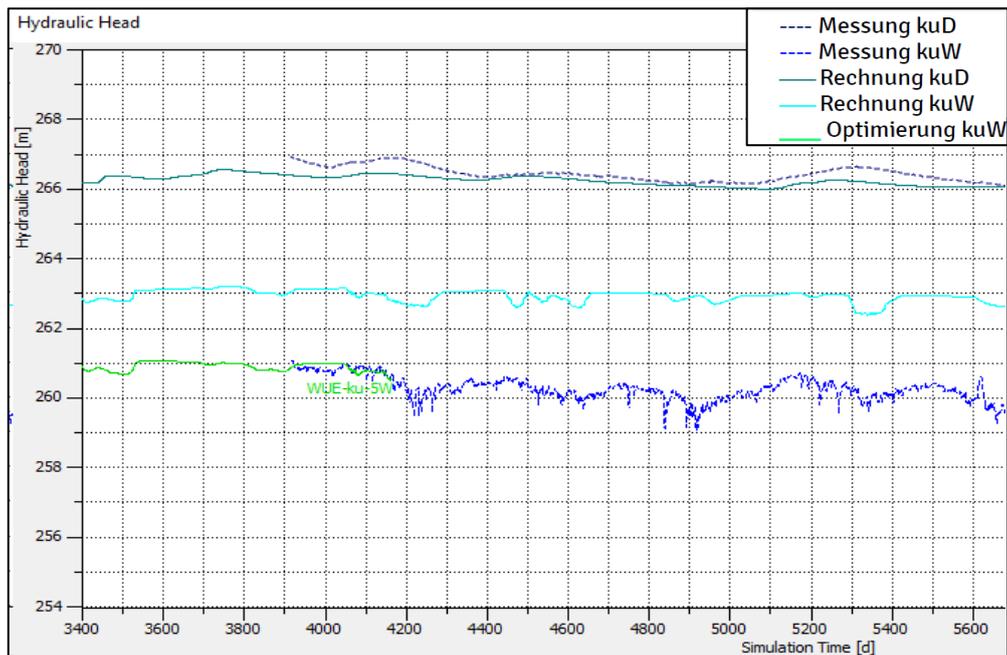


Abbildung 5: Vergleich der modellierten Wasserstände (durchgehende Linien) mit den Messzeitreihen (gestrichelte Linien) am Beispiel der GWM WUE-ku-5. In grün dargestellt ist die Ganglinie des Optimierungsversuchs

Aus folgenden Gründen musste sich trotz der optischen Verbesserungen in den Gangliniengrafiken gegen die lokale Anpassung der kf-Werte entschieden werden: Die erzielte Übereinstimmung der modellierten Ganglinien mit den vom Sondermessnetz aufgezeichneten Wasserständen suggeriert eine Wiedergabegenauigkeit, die für den Großteil des Modellraums nicht besteht. Für wenige lokale Beobachtungspunkte wurden die kf-Werte kleinräumig so justiert, dass sich der modellierte Wasserstand an diesen Stellen den erfassten Ganglinien angleicht, ohne dass für diesen Vorgang reale kf-Messwerte verwendet werden konnten. Die Zonierung führte überdies zu starken numerischen Instabilitäten und Modellabbruch. Diesem Problem wäre nur durch eine erneute, enorm zeitaufwändige Überarbeitung zu begegnen gewesen. Allerdings hätten sich auch in diesem Fall bei jeder weiteren Szenarienrechnung mit leicht veränderten Input-Daten erneute Instabilitäten ergeben, und damit eine starke Beeinträchtigung der praktischen Modellnutzung. Durch die komplexere Parametrisierung der hydrogeologischen Einheiten wäre die bereits mehrtägige Rechenzeit für einen Simulationsdurchlauf weiter verlängert worden. In Abwägung aller Möglichkeiten und Einschränkungen und in Rücksprache mit dem LfU sowie den beauftragten Ingenieurbüros wurde auf eine modelltechnische Umsetzung der kf-Wert-Zonierung verzichtet. Es wurde sich für die Beibehaltung der ursprünglichen kf-Wert-Verteilung entschieden und damit für ein numerisch robustes Regionalmodell, welches den Systemzustand und dessen mehrjährige Entwicklung im Mittel schlüssig abbildet und Szenarien verlässlich rechnet. Für lokale bzw. punktuelle Aussagen ist das LWHM hingegen nicht geeignet.

7. Sensitivitäts- und Szenarienanalyse

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 8.2.1, 8.3)

Im Anschluss an die Kalibrierung und damit Fertigstellung des gekoppelten Modells sowie die Simulation des IST-Zustands wurden Analysen durchgeführt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde die Einflussnahme einzelner Modellparameter auf den System-Output analysiert,

um die Funktionsweise des Modells zu testen. In der Szenarioanalyse wurden hingegen Kombinationen aus realitätsnah veränderten Eingangsdaten und Parametersätzen untersucht. Mit den insgesamt elf Rechenläufen können die Folgen einer Klima-, Grundwassernutzungs- oder Landnutzungsveränderung abgeschätzt werden. Die einzelnen Varianten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Betrachtet wurden der Einfluss der meteorologischen Eingangsdaten (S1), der landwirtschaftlichen Grundwasserentnahme (S2, B) und der Bewässerung (S3) sowie das Zusammenwirken dieser Größen (WS). In Anbetracht der Rechendauer von 5-7 Tagen für jeden Simulationsdurchlauf war nur eine begrenzte Anzahl an Variationen möglich. Dies ist auch der Grund für den Verzicht auf eine schrittweise Anpassung einzelner Parameter. Stattdessen wurde stets nur eine positive und eine negative Veränderung gleicher Höhe gerechnet.

Tabelle 3: Rechenläufe der Sensitivitäts- und Szenarienanalyse

ID	Variantenbezeichnung	Parameteranpassung
S0	Basis-Szenario / IST-Zustand	Simulation der Jahre 2005 - 2019 unter tatsächlichen klimatischen Randbedingungen (DWD-Daten), mit tatsächlichen Grundwasserentnahmemengen (Wassertagebücher Landwirte), und realistisch geschätzter Bewässerungsfläche (InVeKoS-Daten)
S1-1	Klima positive Änderung	Erhöhung Lufttemperatur um 1,5 °C Erhöhung der Niederschläge um 10 %
S1-2	Klima negative Änderung	Erhöhung der Lufttemperatur um 1,5 °C Verringerung der Niederschläge um 10 %
S2-1	GW-Entnahme positive Änderung	Erhöhung Grundwasserentnahmen / Beregnung um 30 %, Klima wie S0
S2-2	GW-Entnahme negative Änderung	Verringerung Grundwasserentnahmen / Beregnung um 30 %, Klima wie S0
S3-1	Anteil bewässerte Flächen positive Änderung	Erhöhung Anteil bewässerter Flächen um 25 % (+416 ha), Klima wie S0
S3-2	Anteil bewässerte Flächen negative Änderung	Verringerung bewässerter Flächen um 25 % (-416 ha), Klima wie S0
B1	Keine Beregnung und GW-Entnahmen	ansonsten wie Ist-Zustand S0
B2	Beregnung und GW-Entnahmen wie genehmigt	bewässerte Flächen wie S3-1, Klima wie S0
WS1	Trockenjahre	Erhöhung der Lufttemperatur um 1,5 °C (wie S1-2) Verringerung der Niederschläge um 10 % (wie S1-2) Erhöhung Grundwasserentnahmen / Beregnung um 10 % Anteil bewässerter Flächen wie Ist-Zustand S0
WS2	Nassjahre	Lufttemperatur wie Ist-Zustand S0 Erhöhung der Niederschläge um 10 % (wie S1-1) Verringerung Grundwasserentnahmen / Beregnung um 10 % Anteil bewässerter Flächen wie Ist-Zustand S0

Bei den Klima-Betrachtungen S1-1 und S1-2 wurde für beide Rechenläufe vor dem Hintergrund des Klimawandels ein Anstieg der Lufttemperatur um 1,5 °C angenommen, während eine Veränderung des Niederschlags um +/- 10 % erfolgte. Dadurch konnte der Einfluss des Niederschlags klarer herausgearbeitet werden. Die Auswirkungen der Temperaturerhöhung lässt sich im Vergleich mit dem Szenario ‚Nassjahre‘ WS2 erkennen. Überdies wurde vom WWA AB im Nachgang die Variante S1-1 ohne den Anstieg der Lufttemperatur gerechnet, um den Einfluss der verringerten Grundwasserentnahme und Bewässerung im Szenario WS2 ausmachen zu können. Da sich lediglich minimale Unterschiede in den Simulationsergebnissen ergaben, wird bei der Betrachtung der Modellierungsergebnisse im Folgenden nicht weiter auf den zusätzlichen Rechenlauf eingegangen. Die innerjährliche Verteilung der klimatischen

Wasserbilanz (KWB) wurde bei der Veränderung der Klimaparameter generell nicht beeinflusst.

In den Rechenläufen S2 und B steht die Grundwasserentnahme aus landwirtschaftlichen Brunnen und Brunnen der Trinkwasserversorgung (TWV) im Fokus. Bei S2-1 und S2-2 wird sie um +/- 30 % variiert, B1 hingegen untersucht einen Systemzustand ganz ohne Grundwasserentnahmen, B2 wiederum die komplette Ausschöpfung der genehmigten Mengen und verstärkte Bewässerung. Die Rechenläufe S3-1 und S3-2 spiegeln einen erhöhten bzw. verringerten Flächenanteil bewässerungswürdiger Kulturarten wieder, indem 25 % der Ackerflächen anderen Fruchtfolgen zugeordnet wurden. Kombiniert sind die veränderten Faktoren in den Szenarien Nass- und Trockenjahre.

Nach Vorliegen aller Ergebnisse zu den genannten Rechenläufen (inkl. IST-Zustand) konnte das Systemverhalten mit seinen Einflussfaktoren beschrieben und die zu Beginn vom Auftraggeber in der Auftragsbeschreibung aufgeworfenen Fragen [Tabelle 4] ausführlich beantwortet werden. Die Antworten sind in *BAH und R&H Umwelt, 2021*, Kapitel 8.3 nachzulesen.

Tabelle 4: Mit dem LWHM zu beantwortende Fragen

1	Wie schnell reagieren die Grundwasserleiter im Unteren Keuper auf klimatische Veränderungen (trockene/niederschlagreiche Jahre)? Wie verändert sich die Grundwasserneubildungsrate für den Unteren Keuper mit klimatischen Schwankungen?
2	Zu welchen Anteilen trugen 1. die klimatischen Veränderungen seit Modellierungsbeginn und 2. die Grundwasserentnahmen in der Bergtheimer Mulde zu den sinkenden Grundwasserständen der vergangenen Jahre bei?
3	Wie unterscheiden sich die nicht bewässerten Äcker in der Bergtheimer Mulde von den bewässerten Feldern hinsichtlich Verdunstung und Versickerung (quantitativ und qualitativ)?
4	Wie verändert sich der Landschaftswasserhaushalt (qualitativ und quantitativ), wenn vermehrt bewässerungsstarke Kulturen angebaut werden (Berechnung auf Basis abgewandelter InVeKoS-Shapefiles mit einem hohen Anteil an bewässerungsstarken Kulturen)? Konnte dieses Phänomen im Modellierungszeitraum beobachtet werden?
5	Welche jährlichen Grundwasserentnahmemengen sind in der Modellregion mittelfristig nachhaltig nutzbar?
6	Ab welcher Grundwasserspiegelabsenkung werden Gewässerabschnitte der Pleichach und Kürnach stark negativ beeinflusst oder fallen trocken? Die kritische Absenkung soll für die sechs Doppel-GWM des Sondermessnetzes berechnet werden.
7	Falls es die Datenbasis zulässt: Wie verändern sich Bodenwassergehalt und Grundwasserspiegel, wenn für die Modellierung statt der „tatsächlichen“ Grundwasserentnahmemengen die genehmigten Grundwasserentnahmemengen eingesetzt werden (Veränderung der Modellparameter: Abflussmenge in den Vorflutern, Bodenwassergehalt, Grundwasserneubildung).

8. Modellierungsergebnisse

8.1 IST-Zustand

(*BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 5.5.2.5, 6.2.7, 6.4, 8.1.3, 8.3*)

Die mit ArcEGMO ermittelten Gebietsniederschläge für den Modellraum liegen bei 626 mm/a, die durchschnittliche Lufttemperatur beträgt 9,7 °C. Während sich über den Simulationszeitraum ein deutlich zunehmender Trend bei der Lufttemperatur abzeichnet, ist die Abnahme der Niederschläge nicht signifikant. Die Jahre 2015 und 2018 treten als extreme Trockenjahre, die Jahre 2007 und 2010 hingegen als feuchtere Perioden hervor. Mit Blick auf die vom LfU generierte, langjährige Grundwasserneubildungszeitreihe für den Amtsbereich ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Jahre 2007 und 2010 keine expliziten Nassjahre darstellen [Abbildung 19]. Den GWN-Werten des Zeitraums 1951 - 2020 nach zu urteilen befindet sich der komplette Simulationszeitraum in einer Trockenphase.

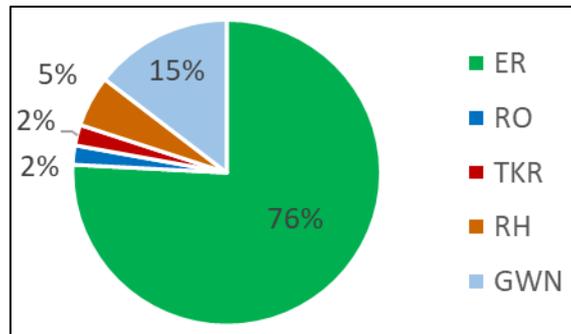


Abbildung 6: Bodenwasserbilanz mit den Komponenten Verdunstung (ER), Grundwasserneubildung (GWN), Trennkanaalisationsabfluss (TKR), Oberflächenabfluss (RO) und hypodermischer Abfluss (RH) = Interflow

Die Verdunstung hat mit 76 % den größten Anteil am Wasserhaushalt in der Bergtheimer Mulde [Abbildung 6]. Nur 15 % des Niederschlags tragen zur GWN bei. Durch hohe Verdunstungswerte ergibt sich eine im Mittel negative klimatische Wasserbilanz, die sich besonders seit 2011 drastisch verringert. Sie bedingt gleichsam eine Abnahme der Bodenfeuchte, der Zwischenabflüsse und der GWN. Zur Veranschaulichung dieser Entwicklung wurde der Untersuchungszeitraum in zwei zehnjährige, sich überlappende Perioden unterteilt und diese miteinander verglichen [Abbildung 7 und 8]. In der zweiten Periode verringern sich die zur GWN beitragenden Sickerwassermengen erkennbar, insbesondere von Februar bis Mai.

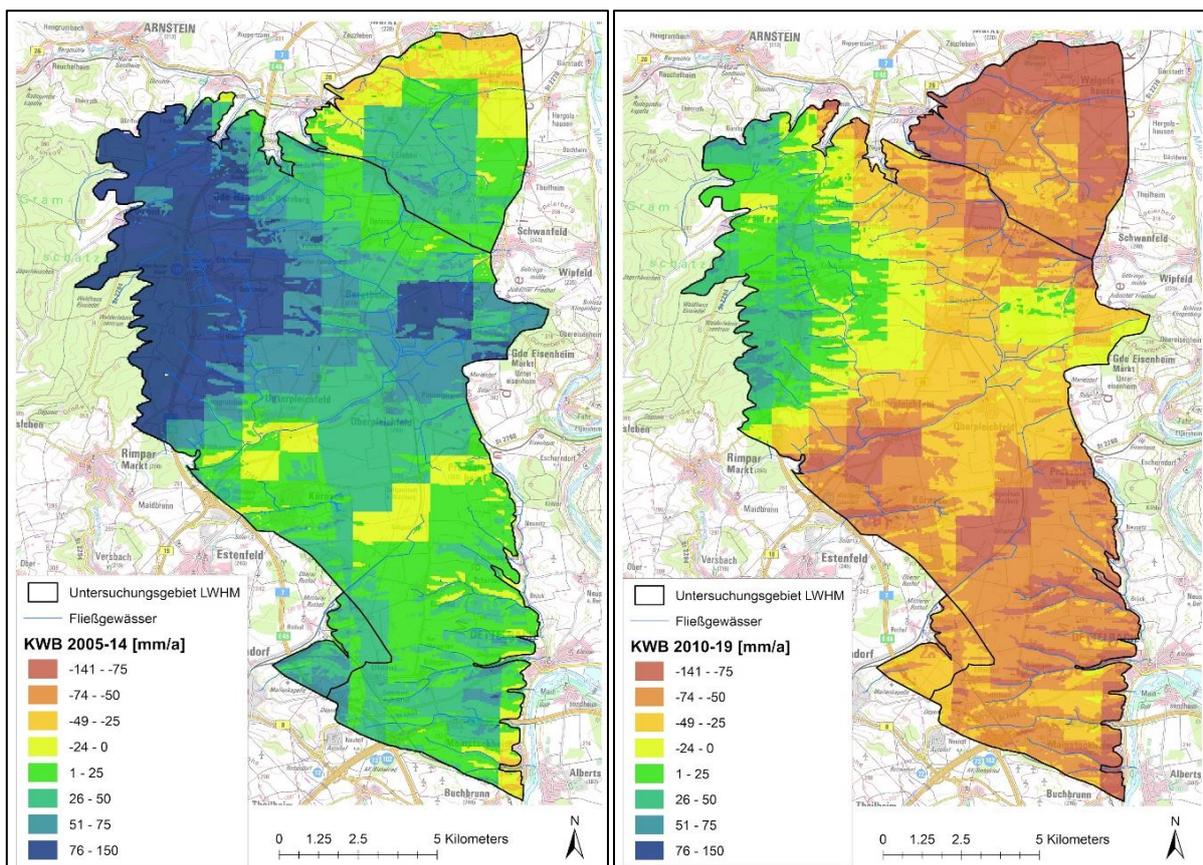


Abbildung 7: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz im Simulationszeitraum; die KWB als Summe der Jahre 2005 - 2014 ist links, die KWB als Summe der Jahre 2010 - 2019 rechts dargestellt

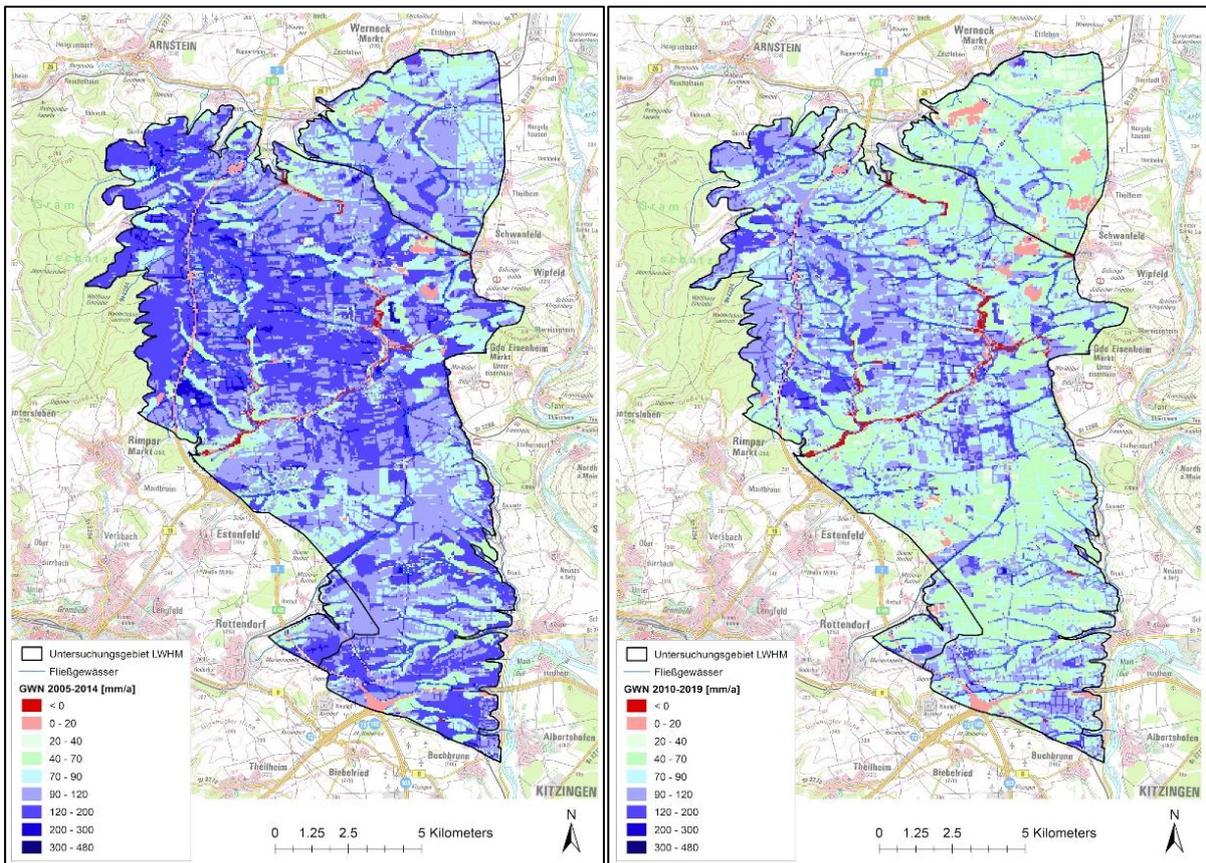


Abbildung 8: Jährliche Grundwasserneubildung als Sickerwasser in 2m Tiefe, 2005 - 2014 links und 2010 - 2019 rechts

Mit 1,3 mm/a hat die Bewässerung im Gebietsmittel nur einen geringen Anteil am Wasserhaushalt [Anhang 2]. In der Abbildung 9 sind tatsächliche Förderungs- und Beregnungsmengen dem Bewässerungsbedarf gegenübergestellt, aufsummiert über den gesamten Modellraum. Der Bedarf wurde als Differenz zwischen dem im Boden vorhandenen, pflanzenverfügbaren Wasser und der fruchtartenspezifischen Zielfeuchte berechnet. Gemäß diesem Ansatz liegt der Bedarf im Modellraum etwa dreimal so hoch wie die tatsächliche Bewässerung. Dabei ist eine geringe Unterschätzung der tatsächlichen Bewässerungsmengen aufgrund von Datenlücken in den Entnahmeaufzeichnungen der Landwirte zu berücksichtigen.

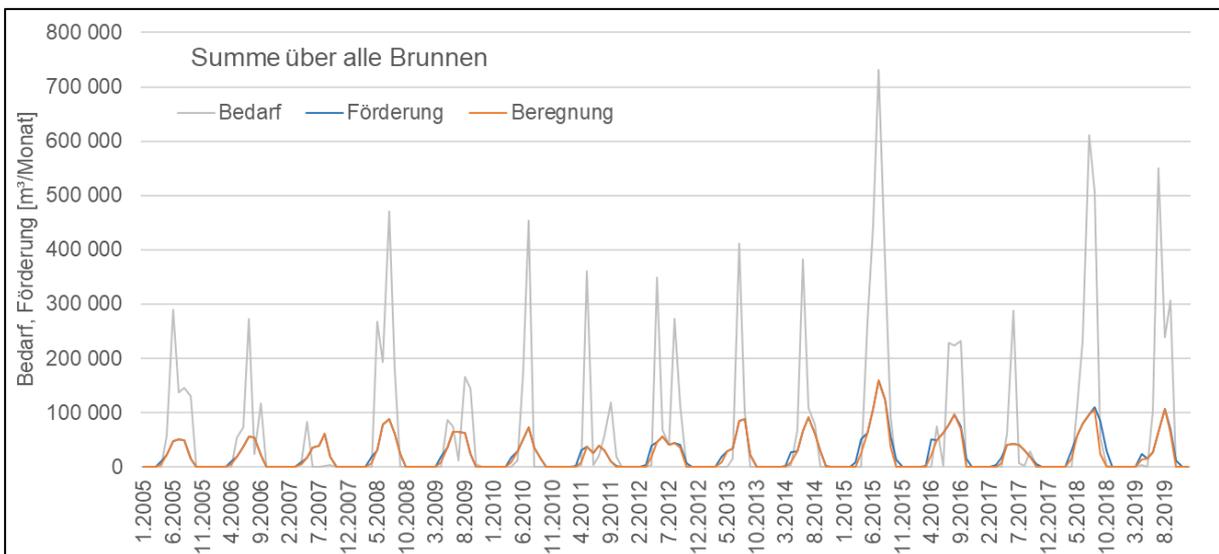


Abbildung 9: Bewässerungsmengen in der Bergtheimer Mulde über den Simulationszeitraum hinweg, differenziert nach berechnetem Bedarf, tatsächlicher Grundwasserförderung und der davon abgeleiteten Beregnungsmenge

Die geringe Einflussnahme der landwirtschaftlichen Brunnen auf die Gesamtwasserbilanz der Bergtheimer Mulde wird durch die Ergebnisse der Grundwassermodellierung unterstrichen. Hauptsächlich dominieren die Grundwassererneubildung und der Abfluss über die Oberflächengewässer die Höhe der Gesamtbilanz. Die GWN unterliegt im Simulationszeitraum den stärksten Schwankungen. Die Entnahme aus den Landwirtschafts- und TWV-Brunnen spielt eine untergeordnete Rolle.

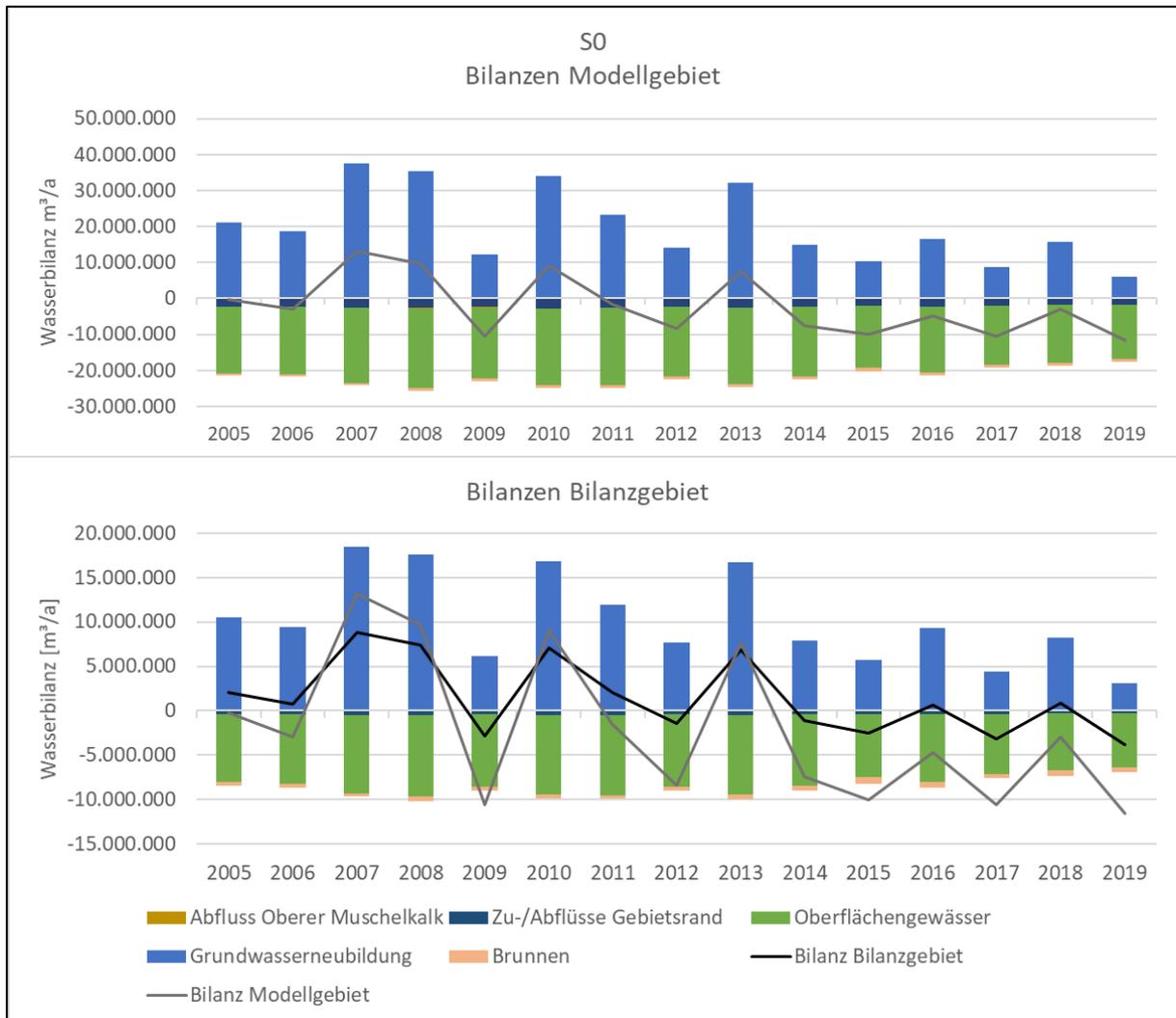


Abbildung 10: Grundwasserbilanzen für den gesamten Modellraum und das Bilanzgebiet (IST-Zustand = S0)

Abbildung 10 stellt die jährlichen Bilanzkomponenten für das Modell- und Bilanzgebiet über den Simulationszeitraum grafisch dar. Im zentralen Bereich der Bergtheimer Mulde, dem Bilanzgebiet mit höherer Brunnendichte, ist das Gewicht der Entnahmen auf die Gesamtbilanz erwartungsgemäß etwas größer. Nur ein kleiner Anteil der im LWHM berücksichtigten Entnahmen findet außerhalb des Bilanzgebiets statt (Abbildung 11, vgl. dunkelblaue und orangene Linien). In diesem Zentralbereich werden jährlich relativ konstant etwa 270.000 m^3/a durch die TWV (ca. 70 % der genehmigten Mengen), im Mittel 320.000 m^3/a durch die Landwirtschaft aus dem Unteren Keuper entnommen, wobei der landwirtschaftliche Anteil stärker variiert. In Abbildung 11 ist die Entwicklung der Brauch- und Trinkwasserförderung im Bilanzgebiet gezeigt (blaue, durchgezogene Linien). Der leicht ansteigende Trend in den landwirtschaftlichen Entnahmen ist durch die Häufung trockenerer Jahre und den wachsenden Anbau bewässerungsintensiver Kulturen zu erklären. Zu beachten ist bei der Betrachtung dieser tatsächlichen Entnahmemengen die bessere Datenlage in späteren Jahren. Die von den Landwirten übermittelten „Wassertagebücher“ stellen in der Modellierung des IST-

Zustands die Grundlage für die Brunnenentnahmen dar und lagen für die Anfangsjahre des Simulationszeitraums nur sehr lückenhaft vor.

Wie die Abbildung 11 anschaulich aufzeigt wird Grundwasser in der Bergtheimer Mulde nicht nur aus dem Unteren Keuper sondern auch aus dem Obere Muschelkalk gefördert. Einige Brunnen erschließen den Oberen Muschelkalk mit, in wenigen Fällen wird dieser sogar vorwiegend genutzt. Bei der Trinkwasserversorgung [REDACTED] wird bspw. ein beträchtlicher Anteil aus dem Muschelkalk entnommen. Die Differenz zwischen Modellinput und -output lässt jene Menge abschätzen, welche aus dem tieferen Grundwasserstockwerk gepumpt wird. Diese Differenz wird allerdings vom Modell selbst berechnet, über eine spezielle untere Randbedingung bei mischverfilterten Brunnen.

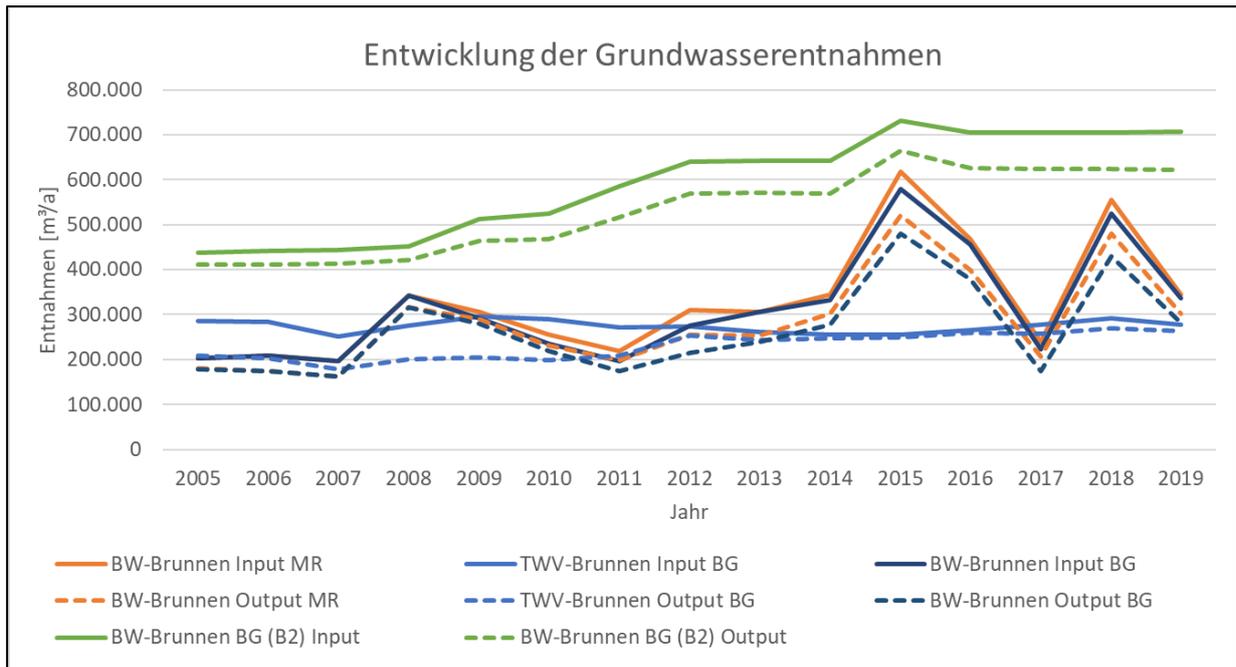


Abbildung 11: Entwicklung der Brunnenentnahmen über den Simulationszeitraum. Die gestrichelten Linien zeigen den aus dem Unteren Keuper gewonnenen Anteil (Modelloutput), die durchgezogenen Linien die Gesamtentnahmemenge (Modellinput). Abkürzungen: BW = Brauchwasser, TWV = Trinkwasserversorgung, MR = Modellraum, BG = Bilanzgebiet, B2 = Szenario mit genehmigten Entnahmemengen

Durch die Visualisierung der Grundwasserbilanzen [Abbildung 10] wird überdies ersichtlich, wie sich ab 2014 die Jahresbilanzsumme mit rückläufigen Neubildungsraten in den negativen Bereich verlagert. Auch die Grundwasserstandsganglinien an Beobachtungspunkten und Messstellen, weisen für diesen Zeitraum einen negativen Trend auf. Eine nachhaltige Grundwassernutzung, also die Entnahme jener Menge, welche sich anschließend durch Neubildung wieder regeneriert, war somit in der vergleichsweise trockenen Phase ab 2014 nicht möglich. Die nachhaltig realisierbare Entnahme hängt letztlich stark vom betrachteten räumlichen und zeitlichen Rahmen und der in diesem Zeitraum vorherrschenden klimatischen Entwicklung ab. Dies zeigt sich deutlich bei der Mittelung der Grundwasserbilanzkomponenten über verschiedene Zeiträume für Modell- und Bilanzgebiet [Anhang 2, Abbildung A].

Die generierten Grundwasserdifferenzenpläne und -ganglinien bestätigen die Annahme einer verstärkten Grundwasserabsenkung an den Muldenrändern. Der Aquiferspeicher reduziert sich ab 2014 stetig, verursacht durch geringe GWN und die bereits beschriebene negative Grundwasserbilanz. Das Grundwasser folgt dabei dem hydraulischen Gefälle hin zum Muldenzentrum.

Obwohl sich die Brauchwasserbrunnen wenig auf die Gesamtbilanz auswirken, geht deren saisonale Nutzung mit einer weiträumigen Absenkung der Grundwasserstände im Sommer einher, welche sich teilweise auch im Bodenwasserhaushalt bemerkbar machen [Abbildung 17]. Dies liegt an einem Abfall des Überdrucks, der durch die Entnahmen insbesondere aus dem stark gespannten GWL kuW erzeugt wird. Aufgrund der geringen Speicherkoeffizienten gespannter Grundwasseraquifere breiten sich Absenktrichter im Vergleich zum freien Grundwasser schneller aus und überlagern sich gegenseitig, führen jedoch nicht zu einer Entwässerung des GWL (Heath, 1988; Anderson, Flocard, & Lumiatti, 2018). Die Trinkwasserbrunnen im Modellraum tragen ebenso zu diesem Phänomen bei. Ihre Entnahmen fluktuieren allerdings weniger stark und zeichnen sich daher nicht erkennbar in den Grundwasserganglinien ab. Die lokal bis zu mehreren Metern betragenden Absenkungen sind in den Wasserständen der Messstellen durch zunächst steiles Abfallen und nach Einstellen der Bewässerungsaktivitäten steile Wiederanstiege geprägt. Wie Abbildung 12 aufzeigt, kann das Modell die lokale Intensität der Absenkungen und damit auch deren räumlich Ausdehnung nicht exakt wiedergeben. Begründet ist dies hauptsächlich in der komplexen Stratigraphie und Hydrogeologie des Unteren Keupers, welche im Modell stark vereinfacht dargestellt werden mussten (s. auch Kapitel 6). Die Modellergebnisse haben daher die Absenkungen betreffend eher qualitativen als quantitativen Charakter; bereichsweise ist von ausgeprägteren Absenktrichtern auszugehen. Nur Vor-Ort-Untersuchungen, etwa Pumpversuche mit Beobachtung angrenzender Messstellen, Brunnen und Quellen, ließen die Auswirkungen des Druckabfalls genauer ausmachen. Im Jahr 2017 wurde im Rahmen eines Pumpversuchs an landwirtschaftlichen Bewässerungsbrunnen südlich von Euerfeld und Schernau bereits beobachtet, wie mit Einsetzen der Förderung aus dem gespannten Grundwasser gleichzeitig die Quellschüttung des über 500 m entfernt gelegenen Mutzenbrünneins von 1,25 l/s auf 0,75 l/s einbrach und der Grundwasserstand eines benachbarten landwirtschaftlichen Brunnens in 180 m Entfernung um etwa 25 cm sank (BGI - Beratende Geologie GbR, 06.03.2017).

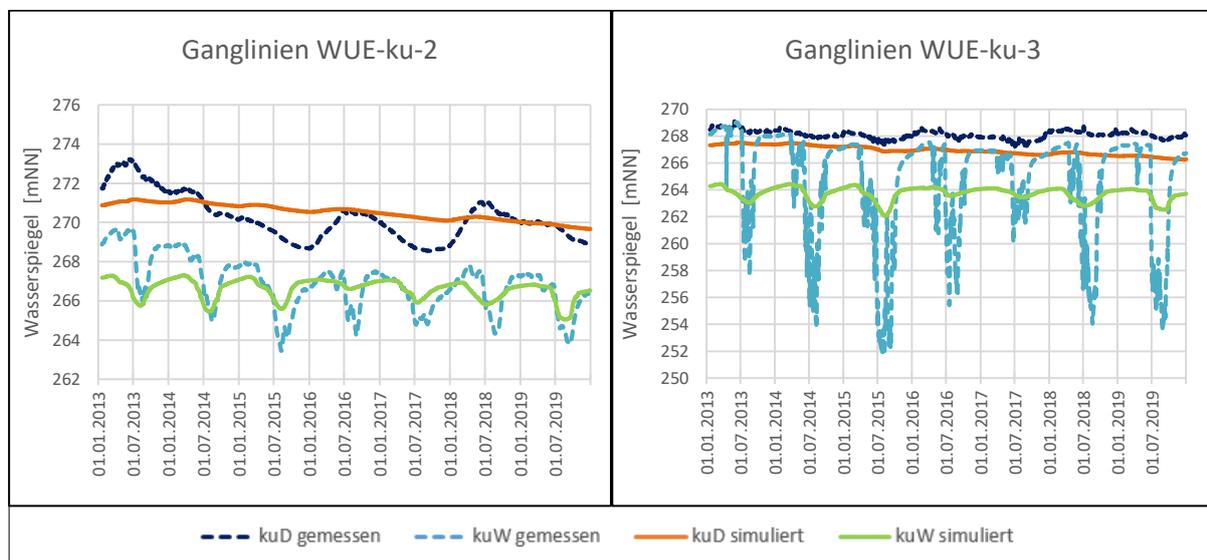


Abbildung 12: Modellerte und gemessene Ganglinien der Messstellen WUE-ku-2 und -3. Entnahmebedingte Absenkungen der Grundwasserstände können vom Modell nur tendenziell reproduziert werden

8.2 Auswirkung veränderter Klimaparameter

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 8.2.2, 8.2.4, 8.2.6, 8.2.7)

Das Klima, mit den Größen Temperatur und Niederschlag, hat den stärksten Einfluss auf die Modellergebnisse. Veränderungen der Parameter „Anteil bewässerter Fläche“ und „Höhe der Grundwasserentnahmen“ fallen weit weniger ins Gewicht. Diese Rückschlüsse lassen sich

aus der Betrachtung der Szenarien S1 und WS, verglichen mit den Szenarien S2, S3 und B ableiten. Ein Temperaturanstieg wirkt sich bedeutend auf die Evapotranspiration aus. Eine Steigerung der Jahresmitteltemperatur um 1,5 °C hat eine Erhöhung der potentiellen Evapotranspiration um 32 mm/a zur Folge. Steht genug Niederschlags- bzw. Bodenwasser zur Verfügung, steigt bei höheren Temperaturen auch die reale Verdunstung deutlich an. Was über Boden und Vegetation verdunstet wird, trägt wiederum nicht zur Grundwasserneubildung bei. Steht allerdings nicht genug Bodenwasser zur Verfügung steigt mit den höheren Temperaturen die Differenz zwischen potentieller und realer Verdunstung und damit der Trockenstress für die Vegetation.

Die relevanteste Einflussgröße ist jedoch der Niederschlag. Eine Erhöhung des Niederschlags um 10 % bewirkt eine merklich höhere GWN sowie mehr Zustrom aus dem Grundwassersystem in die Oberflächengewässer. Dies stellt sich in Abbildung 13 anschaulich dar: Die jährlich gebildete Grundwassermenge in den Szenarien mit erhöhtem Niederschlag (S1-1 und WS2) liegt deutlich über den Ergebnissen des IST-Zustands. Beim Szenario S1-1 werden jährlich gut 2,5 Mio. m³ GWN mehr gebildet, beim Szenario WS2 (ohne Temperaturanstieg) sogar 3,7 Mio. m³. Die grundwasserbürtigen Oberflächenabflüsse im Bilanzgebiet erhöhen sich um rund 1,1 Mio. m³/a bei S1-1 und 1,6 Mio. m³/a bei WS2.

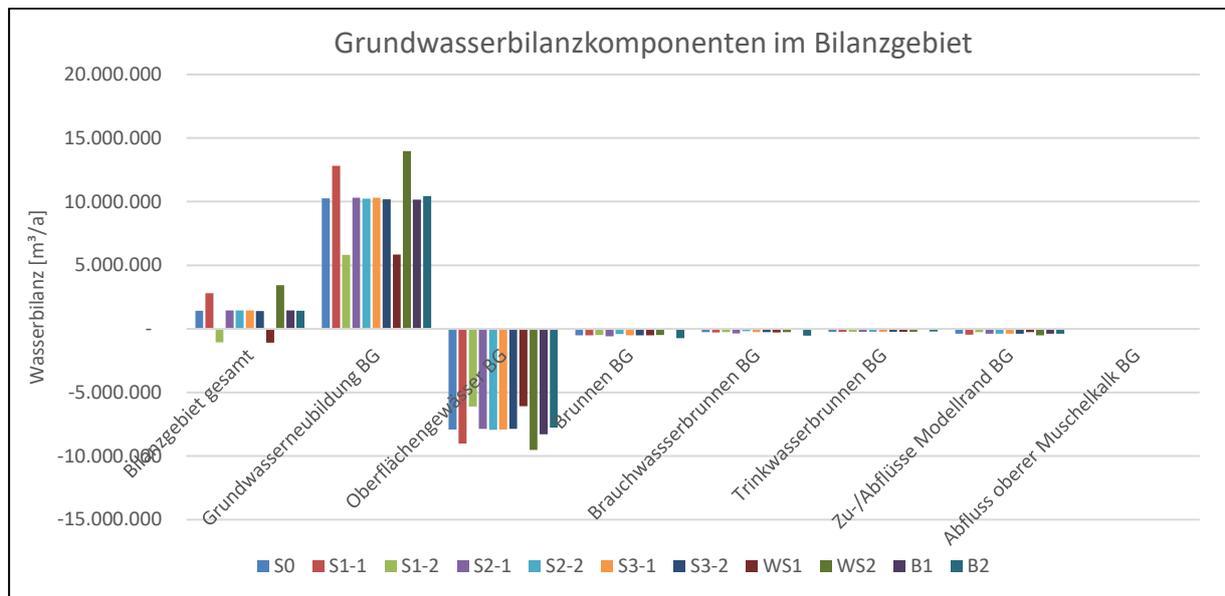


Abbildung 13: Veränderung der mittleren, jährlichen Grundwasserbilanzkomponenten in den einzelnen Szenarien

In der Fläche betrachtet ergeben sich für das Ende des Simulationszeitraums die größten Abweichungen der Wasserspiegel bezogen auf das Basisszenario S0. Bei einer Erhöhung der Niederschläge (Szenario S1-1) erhöhen sich vor allem die Wasserspiegel der höher gelegenen Bereiche des Modellraums im Gramschatzer Wald sowie im Südosten des Modellgebiets. Der kuD reagiert hier stärker als der kuW. Bei einer Verringerung der Niederschläge kehrt sich das Bild um. Besonders die Höhen im Gramschatzer Wald reagieren mit stark sinkenden Wasserspiegeln, sowohl im kuD als auch im kuW (siehe blaue Bereiche in Abbildung 14).

Unter der Annahme einer reinen Niederschlagserhöhung ohne Temperaturanstieg (WS2) liegen am Ende des Simulationszeitraums die Wasserstände der Doppelmessstellen um 70 cm höher als im IST-Zustand (S0). Unter Berücksichtigung eines Temperaturanstiegs liegen die Grundwasserstände an den Doppelmessstellen am Ende des Simulationszeitraums im Mittel nur 55 cm höher [Abbildung 15]. Der in den letzten zehn Jahren beobachtete, abfallende Trend ist an den meisten Messstellen auch in den S1-1 und WS2-Varianten zu beobachten, jedoch

auf einem höheren Wasserspiegelniveau.

Auch die Abflussganglinien an den Oberflächenpegeln reagieren deutlich auf die klimatischen Veränderungen. Durch Schneeschmelze verursachte Peaks verschwinden in allen Szenarien mit Temperaturerhöhung um 1,5 °C, Abflussspitzen im Dezember werden hingegen verstärkt. Insgesamt ist ein merklicher Unterschied im mittleren Abflussgeschehen zwischen S0 und den Szenarien Nass- (WS2) und Trockenjahre (WS1) festzustellen.

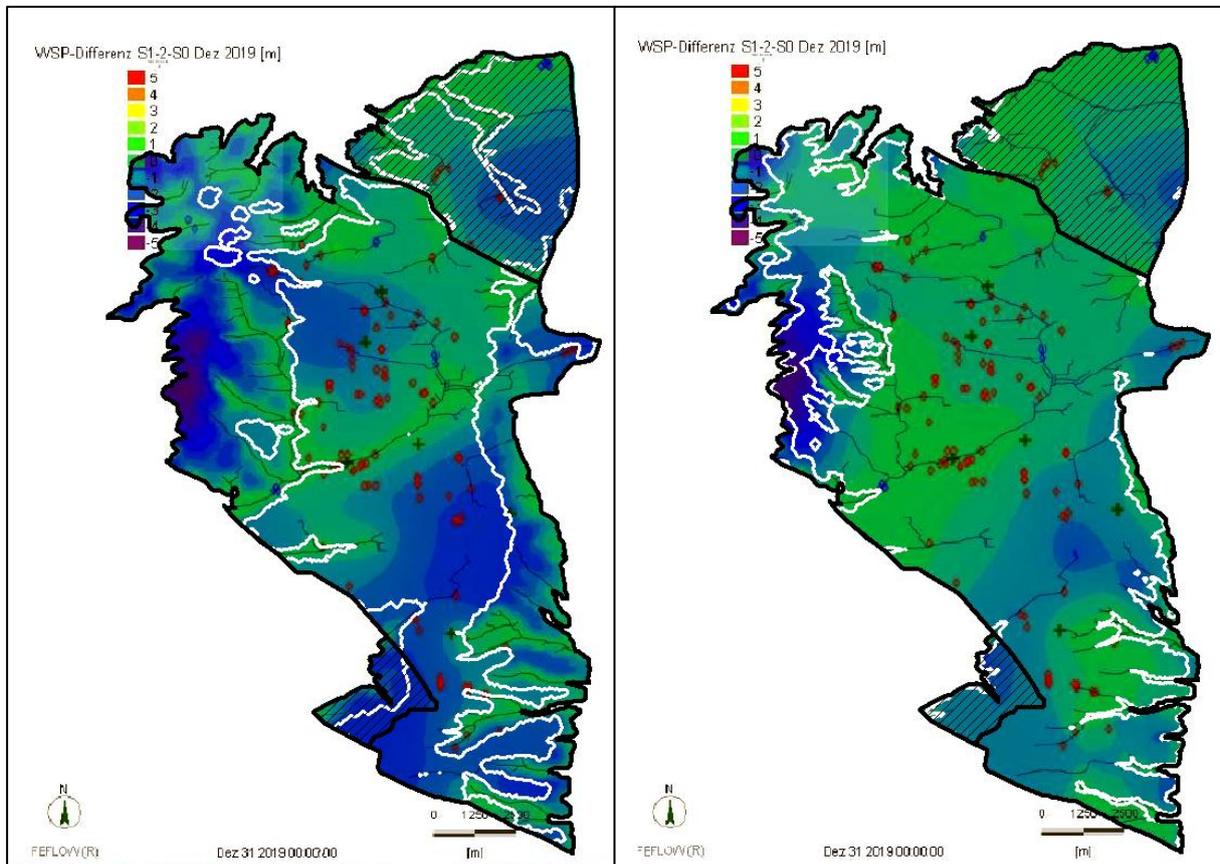


Abbildung 14: Wasserspiegel am Ende des Simulationszeitraums (Dez 2019) beim Szenario S 1-2, dargestellt als Differenz zum Basisszenario S0. Links kuD, rechts kuW; die Verbreitung des jeweiligen GWL weiß umrandet

8.3 Auswirkung veränderter Grundwasserentnahmen

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 8.2.3, 8.2.5, 8.2.6, 8.2.7, 8.3)

Eine Veränderung der Grundwasserentnahme hat einen weitaus geringeren Effekt auf den Landschaftswasserhaushalt als das Klimageschehen, wie aus Abbildung 13 hervorgeht. Alle Szenarien mit einem Anstieg oder Rückgang der Entnahmen (S2, B) beeinflussen die durchschnittliche, jährliche Grundwassergesamtbilanz nur unwesentlich. Ohne Grundwasserentnahmen (B1) ist eine geringfügig niedrigere GWN und ein leicht höherer Zufluss von Grundwasser in die Vorfluter zu erkennen. Unter Ausnutzung aller genehmigten Wasserrechte und damit einer knappen Verdoppelung der Entnahmen (B2) zeigt sich ein umgedrehtes Bild. Durch Verwendung der genehmigten anstatt der tatsächlichen Entnahmen ändern sich im Bilanzgebiet die GWN und die grundwasserbürtigen Abflüsse in den Vorflutern jedoch nur um etwa 2 %, die Ruhewasserspiegel am Ende des Simulationszeitraums liegen an den sechs Doppelmessstellen im Mittel 2 cm tiefer. Auch an den randlich im Modellgebiet gelegenen Beobachtungspunkten und der Messstelle Hausen MU-11 war kein verstärktes Absinken der Grundwasserstände durch das Szenario B2 zu erkennen. Merkliche Änderungen entstehen hingegen bzgl. der saisonalen, entnahmebedingten Absenkungen: Im Szenario B2 sind die

sommerlichen Absenkttrichter tiefer ausgeprägt, im Szenario B1 fehlen sie komplett. Ein Aussetzen der kontinuierlichen Förderung an den TWV-Brunnen verursacht zudem bei zwei Messstellen (WUE-ku-2W und -3W) einen deutlich höheren Ruhewasserspiegel [Abbildung 16].

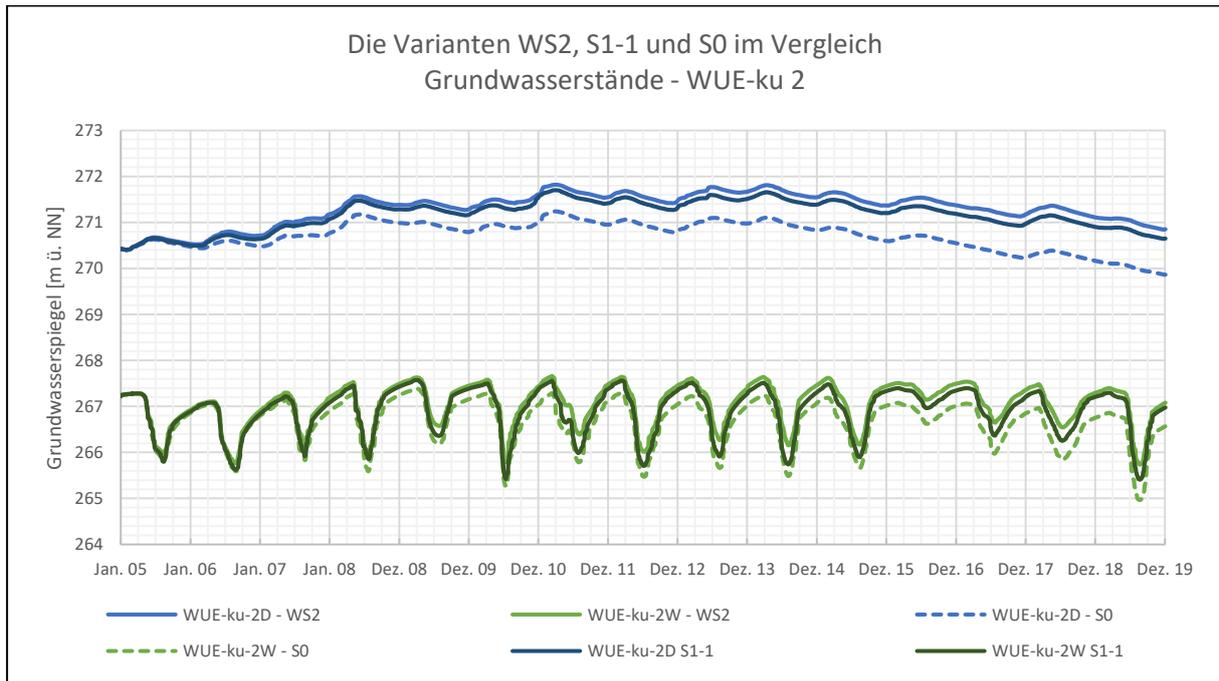


Abbildung 15: Veränderung der Grundwasserstände unter Szenariobedingungen mit erhöhtem Niederschlag, ohne (WS2) und mit (S1-1) Temperaturerhöhung, am Beispiel der Messstelle WUE-ku-2

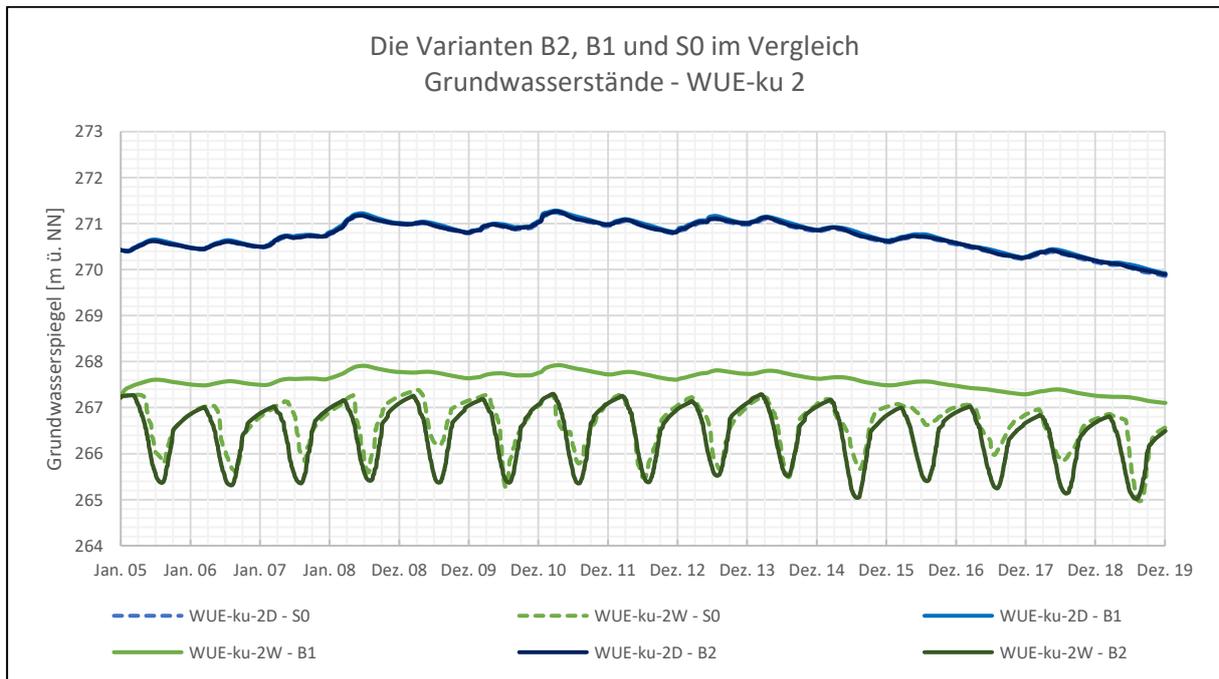


Abbildung 16: Veränderung der Grundwasserstände ohne Grundwasserentnahmen (B1) und mit genehmigten Grundwasserentnahmen (B2) am Beispiel der Messstelle WUE-ku-2. Für den kuD unterscheiden sich die berechneten Ganglinien kaum, weshalb die blauen Linien annähernd deckungsgleich sind

Der Einfluss der landwirtschaftlichen Bewässerung auf den Bodenwasserhaushalt ist ebenfalls begrenzt, aufgrund des überschaubaren Flächenanteils von 8 - 16 %, den bewässerte Sonderkulturen im Modellgebiet ausmachen. Regional betrachtet erzeugen selbst die extremsten Parameterveränderungen in Szenario B1 und B2 nur eine unbedeutende Veränderung der realen Verdunstung und der Sickerwassermenge von maximal 1 mm/a. In den Verläufen der

Abflussganglinie an Oberflächengewässern hebt sich allein das Szenario B2 heraus und dies lediglich an einzelnen Gewässerabschnitten.

Bei der Betrachtung der Szenarien mit veränderten Förder- und Bewässerungsmengen wird augenscheinlich, dass eine verstärkte Bewässerung mit einer geringfügig höheren Grundwasserneubildung einhergeht. Bei verhältnismäßiger Bewässerung wird im Idealfall 100 % des Zusatzwassers von der Vegetation aufgenommen. Dies ist in der Praxis häufig nicht möglich – ein gewisser Anteil verlässt die Wurzelzone ungenutzt. Übermäßige Bewässerung, d. h. wesentlich mehr Zusatzwasser als der Pflanzenbestand aufzunehmen vermag, kann einerseits lokal zu einem Anstieg schneller, oberflächennaher Abflüsse führen, zum anderen führt es zu verstärkter Versickerung und damit um die betreffenden Felder zu einer Abnahme des Grundwasserflurabstands. Besonders deutlich wird das am Szenario B2 unter Annahme der genehmigten Entnahmen [Abbildung 17]. Jedoch zeigt ein Vergleich der Szenarien S0 mit B1, dass bereits im IST-Zustand, mit moderater Bewässerung, auf einigen Flächen ein unrealistisch hoher Anteil an Zusatzwasser der Grundwasserneubildung zukommt [Tabelle 5]. Mit der im LWHM integrierten, stark vereinfachten Abbildung der Bewässerung können die realen Verhältnisse auf Schlägebene räumlich und zeitlich nicht korrekt reproduziert werden.

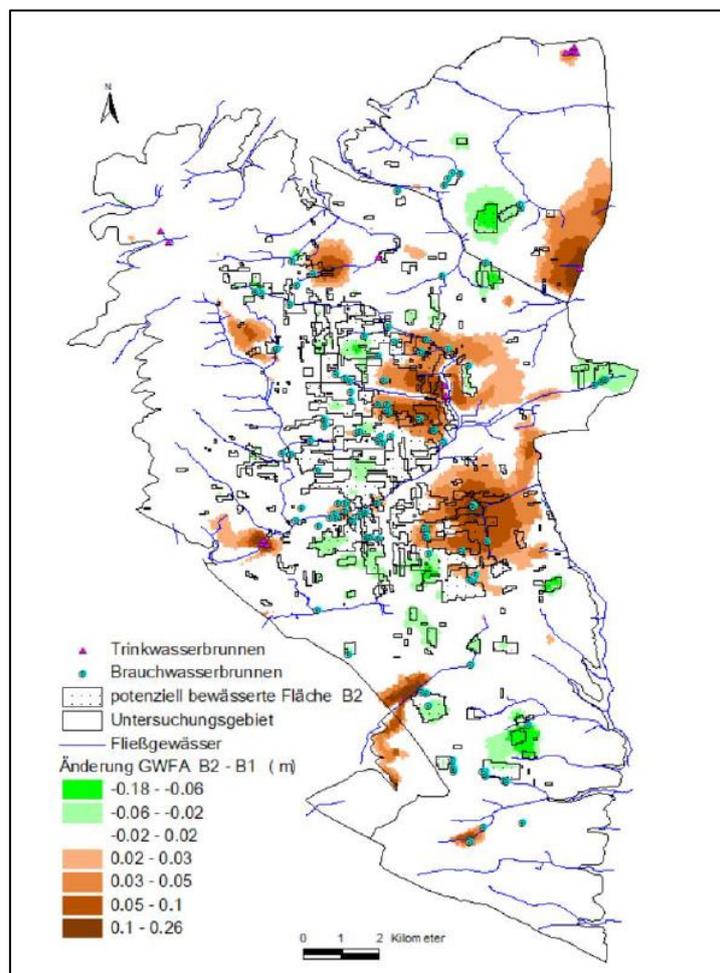


Abbildung 17: Änderung der Grundwasserflurabstände (GWFA) bei Bewässerung mit den genehmigten Mengen (Szenario B2) im Vergleich zum Szenario B1 (keine Entnahmen und Bewässerung), Periode 2010 - 2019

Für die Modellierung des IST-Zustands wurde einerseits mit tatsächlichen Brunnenentnahmen, andererseits mit abstrahierten Fruchtfolgen gearbeitet. Zwar sind die Fördermengen eines Landwirts auch im LWHM nur aus dessen Brunnen entnommen, nur auf dessen Feldern verteilt und nur auf bewässerungswürdigen Fruchtarten aufgebracht worden. Die Fruchtarten entsprechen allerdings nicht in jedem Jahr den tatsächlich angebauten Feldfrüchten. Dies führt

zu bereichsweise unüblich hohen Zusatzwassergaben, um die gesamten Entnahmen vergeben zu können. Daraus resultiert in der Simulation wiederum ein hoher Anteil an versickertem Bewässerungswasser. Eine derartige „Überbewässerung“ sollte in der realen landwirtschaftlichen Praxis im Raum der Bergtheimer Mulde jedoch selten vorkommen. Der weiträumige Einsatz wassersparender Bewässerungstechniken trägt zusätzlich zu einem geringeren Versickerungsanteil bei. Mit Blick auf die nachstehende Tabelle 5 ist davon auszugehen, dass ΔER in Wirklichkeit höher, ΔGWN dagegen niedriger ausfällt.

Wie zuvor bereits erläutert, ist der Einfluss bewässerter Flächen auf das gesamte Modell- oder Bilanzgebiet gesehen durch deren relativ geringen Flächenanteil klein und die beschriebenen Unsicherheiten daher in der Gesamtbetrachtung hinnehmbar. Unberührt davon bleibt die Aussage, dass bewässerungs- und entnahmeverursachte Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt mindestens eine Größenordnung kleiner sind als die durch Klimavariation verursachten Auswirkungen.

Tabelle 5: Zusatzwassergaben ZW und die Veränderungen hinsichtlich Verdunstung ER, schneller oberflächennaher Abflüsse RO+RH und Sickerwasserbildung in 2 m (GWN) als Median über alle potenziell bewässerten Flächen, Vergleich S0 – B1, Periode 2010 - 2019

ZW [mm/a]	Änderung [mm/a]			Anteil an ZW [%]		
	ΔER	$\Delta RO+RH$	ΔGWN	ER	RO+RH	GWN
13	6	1	5	42	11	43

8.4 Einfluss der bewässerten Flächen

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 8.2.3, 8.2.4, 8.2.7)

Der Einfluss der bewässerten Flächen auf Boden- und Grundwasserregime wurde in den Rechenläufen S3 untersucht. Dabei wurde der Flächenanteil der Fruchtfolgen mit bewässerungswürdigen Fruchtfolgegliedern um ein Viertel erhöht (S3-1) bzw. gesenkt (S3-2), bei gleichbleibenden Entnahmemengen und Bewässerungsgaben. Die Reaktion der Bodenwasserhaushaltsgrößen und der Grundwasserstände auf diese Veränderungen ist ähnlich marginal wie bei den Varianten S2 (Grundwasserentnahmen +/- 30 %). Die Grundwasserbilanz, Gangliniendynamik und die Abflüsse an den Oberflächengewässern unterscheiden sich nur äußerst geringfügig gegenüber dem IST-Zustand. Minimale Abweichungen bestehen bei den Größen Verdunstung, GWN und Oberflächengewässerabfluss und bewegen sich im Bereich von < 1 %. Auf eine dezidierte Abhandlung zu den Ergebnissen der Varianten S3 wird daher in diesem Bericht verzichtet.

9. Grenzen der Modellierung

(BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 9)

Die Modellierungsergebnisse sollten stets vor dem Hintergrund bestehender modelltechnischer und datenbedingter Unsicherheiten betrachtet werden. Die korrekte Abbildung komplexer Geometrien, bodenhydrologischer sowie (hydro)geologischer Einheiten und Prozesse setzt immer eine repräsentative Datengrundlage und ein umfangreiches Systemverständnis voraus. Der Landschaftswasserhaushalt vom klimatischen Input über die Bodenzone bis in tiefe Grundwasserstockwerke ist äußerst vielschichtig. Die Bergtheimer Mulde mit ihrer heterogenen Topographie und Morphologie von den Höhen des Gramschatzer Waldes bis in die flachen Talbereiche um Bergtheim, mit tektonischen Störungszonen und mehreren Grundwasserstockwerken, welche zu den Muldenrändern auslaufen lässt sich in ihrer Heterogenität

kaum mit einem repräsentativen Netz an Messdaten abbilden. Die gespannten Grundwasser-Verhältnisse im Muldenzentrum bedeuten eine zusätzliche Herausforderung. Die Vereinfachungen und Annahmen, welche bei der Erstellung des LWHM für weite Bereiche des Modellgebiets ohne genaue Kenntnis des Untergrunds getroffen werden mussten, resultieren in Unsicherheiten hinsichtlich der Simulationsergebnisse. Bei der Modellierung muss der Fokus daher auf den wesentlichen Systemeigenschaften liegen; im Falle des LWHM auf der regionalen Wasserbilanz und der Veränderung von Wasserhaushaltsgrößen und Grundwasserspiegel in Teilgebieten.

Das LWHM erfasst als Regionalmodell rund 207 km² (etwa 36 km² gehören zum sog. Unsicherheitsbereich) mit einer Grundwasserstandsdifferenz > 150 m von der Geländeoberkante bis zur Unterkante des Unteren Keupers. Mehrjährige und saisonale Entwicklungen haben auf der Quadratmeter-Skala qualitative und quantitative Aussagekraft. Standortgenaue Grundwasserhöhen, die lokale fluktuierende Ausprägung der Stockwerkstrennung sowie innerjährliche und entnahmebedingte Schwankungen sind jedoch nur tendenziell, nicht verlässlich im Zentimeter- bis Meterbereich wiederzugeben. Für eine verbesserte Abbildung der Verhältnisse im Grundwasser wäre eine höhere Auflösung der hydrogeologischen Input-Daten (qualitativ hochwertige und tiefreichende Bohrprofile sowie Pumpversuche) erforderlich. Jedoch ist der dafür nötige Aufwand hoch und vermutlich nur im Kontext spezifischer Fragestellung lokal begrenzt sinnvoll.

Gewisse Ergebnisse haben daher eher qualitatives Gewicht, wie etwa der in Kapitel 8.1 beschriebene Überdruckabfall, welcher durch Brunnenentnahmen verursacht zu weiträumigen Absenktrichtern führt und auch die Ganglinien der Messstellen beeinflusst. Die steilen hydraulischen Gradienten im Umfeld entnahmestarker Brunnen werden bedeutend durch die Mächtigkeit, Klüftigkeit und Durchlässigkeit der umgebenden Schichten geprägt. Die genaue räumliche und zeitliche Ausdehnung der Absenktrichter kann deshalb über die generalisierte Geologie im Modell und ohne eine Zonierung der k_f -Werte nicht genau berechnet werden, ebenso wenig die Auswirkungen des Druckabfalls auf einzelne Quellen und Feuchtgebiete. Zwar lassen die Modellergebnisse in Kombination mit dem vorhandenen Hintergrundwissen Schlussfolgerungen zu. Für Aussagen oder die Ableitung von Maßnahmen bestimmte Standorte betreffend sollten diese Schlussfolgerungen allerdings über weitere Beobachtungen und Messungen bestätigt werden.

Generell mussten hinsichtlich der Brunnen und ihrer Nutzung viele Approximationen getroffen werden. Sowohl bezüglich Ausbau und Endteufe der Brunnen als auch bezüglich der erbohrten Schichten und Hauptzuflusszonen lagen in etlichen Fällen keine validen Informationen vor. In der Konsequenz kann es sein, dass einige Brunnen im Modell aus Grundwasserleitern entnehmen, die sie in Realität nicht oder nur bedingt beanspruchen. Monatliche oder jährliche Entnahmemengen wurden auf tägliche Zeitschritte interpoliert. Eine weitere Unsicherheit besteht durch die Vernachlässigung der Brunnen mit kleineren Wasserrechten. Abhilfe könnte durch eine sukzessive Verbesserung und Vereinheitlichung der bisher lückenhaften Datenbestände zu Entnahmekäufen geschaffen werden.

Wie bereits in den Kapiteln 5 und 8.3. diskutiert, konnte die reale Bewirtschaftung der Ackerflächen und deren Bewässerung nur vereinfacht dargestellt werden. Die modelltechnische Umsetzung der landwirtschaftlichen Flächen ist in BAH und R&H Umwelt, 2021, Kapitel 6.2.4 und 6.2.7 ausführlich dargelegt. Trotz Unsicherheiten erscheint die simulierte Größenordnung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sowohl zeitlich als auch räumlich durch die Modellierung erfasst worden zu sein. Eine Optimierung kann nur kleinskalig bei enger Zusammenarbeit mit den dortigen landwirtschaftlichen Betrieben erzielt werden.

Aufgrund der räumlichen Auflösung der Modelleinheiten und der Input-Daten sind auch lokale Aussagen für die Randbereiche der Mulde mit Unsicherheiten belastet. Diese entstehen naturgemäß insbesondere durch am Modellrand nicht abgrenzbare Einflussgrößen z. B. der Einzugsbereich randnaher Brunnen oder Gewässereinzugsgebiete, die über das Modellgebiet des Unteren Keuper hinausreichen. Auch werden im gekoppelten LWHM für die Randbereiche zum Teil Überstaubedingungen ausgegeben, was auf Ungenauigkeiten die Topographie betreffend zurückzuführen ist. Diese erhöhen in der Bodenwasserbilanz die reale Verdunstung um 1 - 2 %, weshalb für Abbildung 6 Ergebnisse des ungekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodells verwendet wurden.

Die Oberflächengewässer stellen neben der Grundwasserneubildung die wichtigste Komponente im Wasserhaushalt der Bergtheimer Mulde dar. Im vorliegenden Modell konnte der Austausch zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser nur schematisch simuliert werden, da keine ausreichenden Daten zu den Gewässergeometrien, zu Wasserstands-Abfluss-Beziehungen und Pegelmessungen vorlagen. Mithilfe der zwischenzeitlich errichteten drei Abflussmesspegel lassen sich die Gewässerabflüsse zukünftig besser kalibrieren und vor allem das zeitweise Trockenfallen von Gewässern abbilden. Durch eine erneute Kalibrierung auf Basis dieser neuen Daten lässt sich schließlich die Bilanzierung des Wasserhaushalts für das Gesamtgebiet weiter verbessern. Der wasserspiegelabhängige Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser würde durch die Erhebung und Einbindung von Vermessungsdaten vor allem auf der lokalen Skala wesentlich an Aussagekraft gewinnen. Unter Einbindung der Wasserspiegel-Abfluss-Beziehungen können die jahreszeitlichen Wasserspiegelschwankungen der Gewässer im Modell berücksichtigt werden. Die Dynamik in den angrenzenden, korrespondierenden Grundwasserleitern würde sich dadurch realistischer erfassen lassen. Hierdurch wären auch qualifizierte Aussagen zu gewässer- und grundwasserabhängigen Feuchtbiotopen möglich.

Trotz der unvermeidlichen Abstraktionen des Modells und lokaler Unschärfen gibt es kein Instrument, mit dem komplexe Zusammenhänge vergleichbar flächendifferenziert abgebildet werden können. Die Beschäftigung mit den Modellvariablen und die Auswertung der Sensitivitäts- und Bewirtschaftungsszenarien tragen zu einem vertieften Systemverständnis bei. Die zentralen Fragen, welche ursächlich für das Modellierungsprojekt waren, konnten erfolgreich beantwortet werden.

10. Die Ergebnisse im Kontext der Klimaentwicklung Unterfrankens

Der Einfluss des Klimas auf den Landschaftswasserhaushalt und die Grundwasserstände in der Bergtheimer Mulde überprägt die Auswirkungen von Grundwasserentnahmen und Bewässerung deutlich. Dies ist ein zentrales Ergebnis der mit dem LWHM ausgeführten Analysen. Jedoch sind die betrachteten 15 Jahre ein vergleichsweise kurzer Zeitraum für meteorologische Aussagen, weshalb die Ergebnisse vor dem Hintergrund der langfristigen klimatischen Entwicklungen in Unterfranken betrachtet werden sollten. Dies erscheint insbesondere für die Ableitung von Maßnahmen sinnvoll, die auf eine dauerhafte Verbesserung der Wassersituation im Raum nördlich von Würzburg abzielen. Berechnungen des LfU und der Universität Würzburg zeigen die Klimasituation Unterfrankens als Wassermangelgebiet in Bayern auf, präsentieren Temperatur- und Niederschlagsverläufe der vergangenen Jahrzehnte und die mögliche zukünftige Entwicklung. Im Folgenden wird darauf näher eingegangen.

Es besteht Konsens darüber, dass der Wasserhaushalt maßgeblich von Temperatur- und Niederschlagsgeschehen abhängt und Veränderungen dieser Größen weitreichende Folgen für Oberflächen- und Grundwasser haben (*LfU, 2021a*). Der Blick in die Vergangenheit zeigt, dass

die Temperatur im Freistaat Bayern zwischen 1951 - 2019 bereits tendenziell um 1,9 °C gestiegen ist (LfU, 2021b). Die intensivsten Veränderungen fanden in den letzten 20 Jahren statt, wie die Abbildung 18 demonstriert. Für die Mainregion ist in diesem Zeitraum ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur von +0,7 °C ermittelt worden (LfU, 2021c). Auch der „Klimabericht Unterfranken“ dokumentiert für den Regierungsbezirk eine gegenwärtige Erwärmung um +0,8 °C in den Jahren von 1990 - 2020 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1970 - 1999. Beide im Rahmen dieses Berichts betrachteten Treibhausgasszenarien (mit und ohne Klimaschutzmaßnahmen, RCP4.5 und RCP8.5) führten den Erwärmungstrend bis Ende des Jahrhunderts fort – nur unterschiedlich stark. Mit einem weiteren Temperaturanstieg ist demnach für alle Jahreszeiten zu rechnen (Schönbein, 2020).

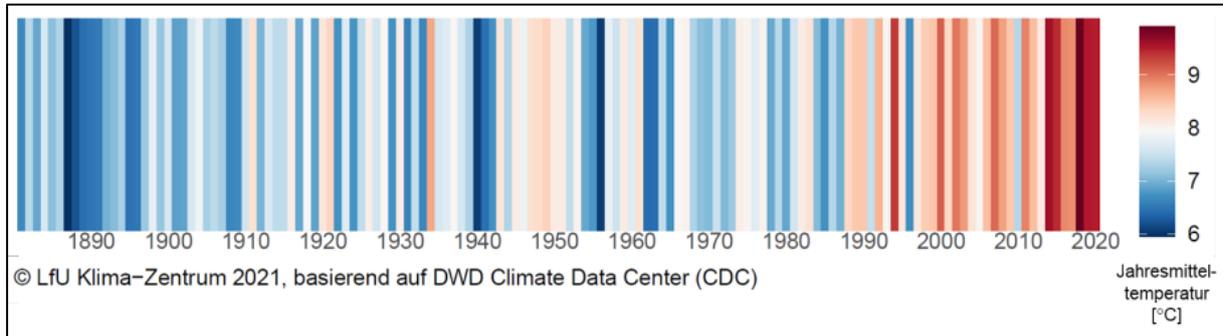


Abbildung 18: Die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Bayern

Im Gegensatz zur Temperaturveränderung ist bezüglich der Niederschlagsentwicklung in der Mainregion für keine Jahreszeit eine statistisch signifikante Zu- oder Abnahme festzustellen. Tendenziell konnte jedoch zwischen 1951 und 2019 eine geringe Zunahme der Jahresmittelwerte beobachtet werden. Nur in den Sommermonaten war eine leichte Reduktion zu verzeichnen (LfU, 2021c).

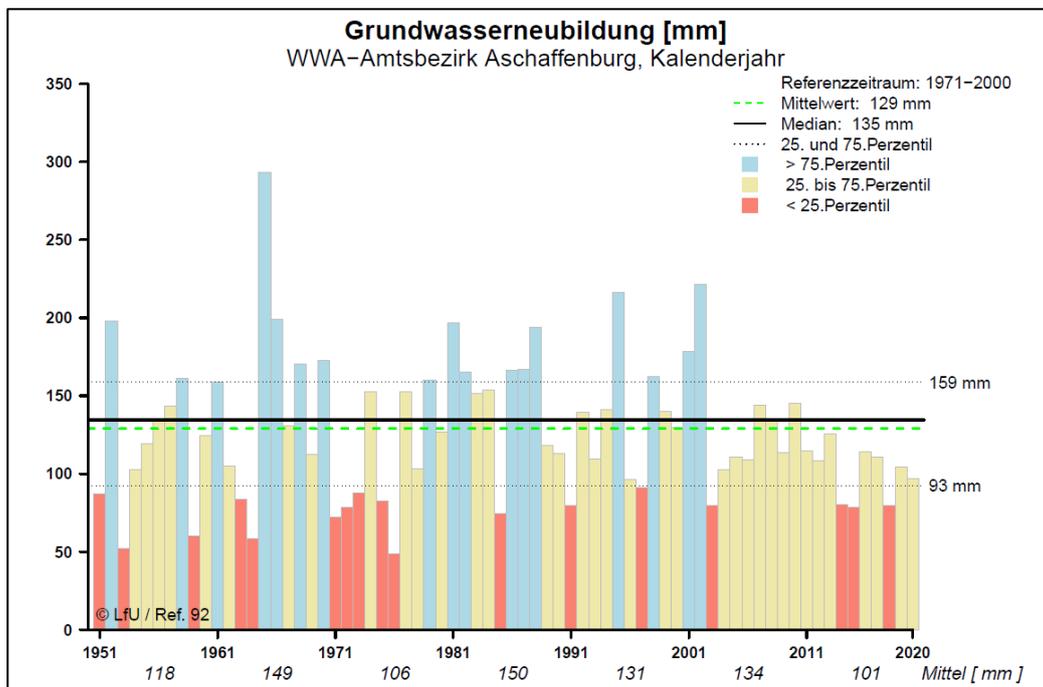


Abbildung 19: Entwicklung der Grundwasserneubildung im Amtsbereich des WWA Aschaffenburg 1951 - 2020

Die Niederschlagsentwicklung seit 2010 ist an dieser Stelle hervorzuheben. In Unterfranken war es im vergangenen Jahrzehnt kontinuierlich zu trocken - nur 2017 lag über dem Referenzwert. Das Klima in dieser Periode verhielt sich gegenläufig zum langfristig beobachteten Trend

und auch zu den Szenariorechnungen, welche ab 2010 von einer leichten Niederschlagszunahme ausgingen. Das unterstreicht die starken Unsicherheiten, welchen die Niederschlagsprognostizierung unterliegt (*Schönbein, 2020*). Diese Unsicherheiten werden auch in den Klima-Modellrechnungen des LfU deutlich, welche eine große Spannbreite der möglichen Niederschlagsentwicklung, von langfristiger Abnahme bis langfristiger Zunahme, aufweisen [Anlage 3].

Die für Deutschland erwarteten Klimaveränderungen erhöhen zudem das Potential verstärkter Extremwetterereignisse (*Hübener, et al., 2017; DWD, 2020*). Auch wenn es aufgrund fehlender langjähriger Messungen momentan noch schwierig ist den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Extremwetterereignissen empirisch zu belegen, so ist für die Zukunft doch von einer Häufung extremer Wetterereignisse wie Trockenperioden, Hochwasser und Starkniederschlägen auszugehen (*Karlsruher Institut für Technologie, o. D.*). Entlang der für Unterfranken gerechneten Szenarien ist eine Zunahme von Extremereignissen, intensiveren Nass- und Trockenjahren, zu sehen. Diese Bipolarität stellt sich für die Sommermonate besonders ausgeprägt dar. Laut *Schönbein, 2020*, „wird sich vermutlich eine Bipolarität zwischen zu nassen und zu trockenen Quartalen und Jahren einstellen — zu Lasten der goldenen Mitte“, was besonders der Landwirtschaft schaden könnte.

Gewässer, grundwasserabhängige Ökosysteme, Wälder und Wiesen aber auch die Landwirtschaft sind von der anhaltenden Trockenheit der letzten Jahre und Jahrzehnte betroffen. Für eine Kompensation des aufgebauten Grundwasserdefizits bedürfte es nasserer Jahre mit gleichmäßiger Niederschlagsverteilung, vorwiegend Winterniederschlägen (*Neumann, 2021*). Vor dem Hintergrund der Klimaprognosen lässt sich hingegen annehmen, dass die Niederschlags- und damit die Grundwasserneubildungsentwicklung in der Bergtheimer Mulde weiter unsicher bleibt. Abbildung 19 lässt vermuten, dass der gesamte Simulationszeitraum bereits in einer Phase verringerter Grundwasserneubildung liegt, sich der Landschaftswasserhaushalt im Vergleich zur zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts demnach schon deutlich verändert hat. Auch wenn ein geringfügiger Anstieg der Niederschläge prognostiziert ist, bestätigt der Blick auf das letzte Jahrzehnt, dass davon nicht zwingend ausgegangen werden kann. Relativ sicher ist hingegen ein langfristiger Temperaturanstieg. Die Ergebnisse des LWHM legen nahe, dass dieser eine veränderte Abflussdynamik, einen Anstieg der potenziellen Evapotranspiration und sinkende Grundwasserstände hervorrufen wird. In der Bergtheimer Mulde wird bereits über Dreiviertel des Niederschlags wieder verdunstet, weshalb nur ein geringer Anteil der Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Diese grundlegende Erkenntnis bestätigt sich auch über die ‚Karten zur Wasserwirtschaft 1:500.000‘, beim Vergleich von Niederschlags-, Gesamtabfluss- und Verdunstungskarte (*LfU, 2012, 2018a, 2018b*), welche in Anlage 4 beigefügt sind. Durch einen zukünftigen Anstieg von Temperatur und Verdunstung würden Hitze- und Trockenstress für die Vegetation und Oberflächengewässer weiter verschärft.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Über das Modellprojekt sollte das Verständnis für das regionale hydrogeologische Prozessgefüge verbessert, die langfristig nachhaltig nutzbare Grundwassermenge ermittelt und die Auswirkungen der Brunnenentnahmen auf wertvolle, wasserabhängige Lebensräume untersucht werden. Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Grundwassernutzung, wie etwa besonders geeignete Brunnenstandorte, sollten aufgezeigt werden.

Mit dem LWHM wurde ein Werkzeug geschaffen, das die Darstellung und Analyse des komplexen Landschaftswasserhaushalts der Bergtheimer Mulde auf regionaler Skala ermöglicht,

vom Klima, über bodenhydrologische Prozesse bis hin zum Abflussgeschehen und der Grundwasserströmung. Überdies sind die Auswirkungen anthropogener Faktoren auf die Wasserflüsse in der Landschaft abgebildet, durch die (landwirtschaftliche) Flächennutzung sowie die Grundwasserentnahme und Bewässerung. Über den Simulationszeitraum von 2005 - 2019 erfasst das LWHM für die 207 km² des Modellraums und das rund 100 km² große Kernaussagegebiet die Änderung der Gesamtbilanz und ihrer Bilanzkomponenten qualitativ und quantitativ verlässlich. Tatsache ist jedoch, dass es sich bei einem numerischen Modell stets um die abstrahierte Abbildung der Wirklichkeit handelt und gewisse Unsicherheiten in Kauf genommen werden müssen. Einige Simulationsergebnisse haben daher zwar qualitativen Wert, sind quantitativ hingegen nur sehr eingeschränkt nutzbar. Punktuell oder auf Schlagenebene sind valide Aussagen mit dem Regionalmodell nicht möglich.

Rechenläufe mit variierten Eingangsdaten lassen die Sensitivität einzelner Parameter und ihre Einflussnahme auf die Landschaft hervortreten. Über eine gleichzeitige Veränderung verschiedener Faktoren können parallele Entwicklungen in der Bergheimer Mulde veranschaulicht werden. Neben der Simulation des IST-Zustands wurden zehn weitere Sensitivitäts- und Szenarioanalysen durchgeführt und ausgewertet.

In der Bergheimer Mulde wird der überwiegende Teil des Niederschlagswassers verdunstet, im Mittel kommen nur 15 % der Grundwasserneubildung zu. Die Modellierung hat gezeigt, dass in den vergangenen 15 Jahren ein stetiger Anstieg der Lufttemperatur mit einem Anstieg der potentiellen Verdunstung einherging, während die reale Verdunstung aufgrund des begrenzten Bodenwasservorrats auf konstantem Niveau bleibt. Daraus resultiert eine steigende Differenz zwischen potentieller und realer Verdunstung, was die Verschärfung des Trockenstresses für die Vegetation verdeutlicht. Obwohl hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung im Modellraum kein signifikanter Trend vorliegt, ist eine tendenzielle Abnahme zu erkennen. Das im vergangenen Jahrzehnt aufgebaute Niederschlagsdefizit in Kombination mit steigenden Temperaturen verursachte eine merkliche Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz über den Simulationszeitraum hinweg. In den Jahren ab 2014 sank die Grundwasserneubildung deutlich, was zu negativen Grundwasserbilanzen und sinkenden Grundwasserständen führte.

Hat die Grundwasserneubildung in den Jahren bis 2014 durchschnittlich noch zur Deckung der für die Bewässerung nötigen Grundwasserentnahmen gereicht, so führten die Entnahmen in den Folgejahren zu einer Verschärfung der bereits negativen Bilanz. Hierbei ist zu betonen, dass die Entnahmen aus landwirtschaftlichen Bewässerungsbrunnen einen vergleichbar geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz haben und nicht ursächlich für das mittel- bis langfristige Sinken der Grundwasserstände sowie die Reduktion des nutzbaren Wasserdargebotes sind. Über diese ‚Stellschraube‘ kann die Wassersituation nicht dauerhaft verbessert, der abnehmende Trend an beobachteten Grundwassermessstellen nicht umgekehrt werden, wie aus dem Szenario ohne Grundwasserentnahmen geschlossen werden kann. Auch unter Verwendung der genehmigten Entnahmemengen, was einer etwaigen Verdoppelung der momentan genutzten Mengen entspricht, wäre die Veränderung der Ruhewasserspiegel marginal, die Grundwasserbilanzen im Modellraum unter den momentanen Klimabedingungen weiterhin im Mittel negativ. Entscheidend für die Bilanz sind die Abflüsse, welche die Landschaft über die Oberflächengewässer verlassen und die Grundwasserneubildung. Diese zwei Faktoren dominieren die Grundwasserbilanz; beide Größen werden wiederum hauptsächlich durch das Klima gesteuert. Niederschlag und Temperatur haben damit den bedeutendsten Einfluss auf die Landschaft. Durch Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse wurde ersichtlich, dass die Veränderung der Gesamtbilanz im Kernaussagegebiet durch die Klimavarianten etwa zwei Potenzen größer ist, als die Veränderung verursacht durch Grundwasserentnahmen und Bewässerung.

Dennoch stellen die saisonalen Grundwasserentnahmen für die Landwirtschaft in den durch Trockenheit gezeichneten Jahren eine zusätzliche Belastung der Landschaft und ihrer Ökosysteme dar. Entnommen wird gerade in den heißen und trockenen Phasen, in welchen die Vegetation bereits unter Trockenstress leidet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich bei Ausnutzung aller Wasserrechte der Zustrom von Grundwasser zum Vorfluter reduzieren und der mittlere Niedrigwasserabfluss in den Gewässerabschnitten verringern kann. Auch wenn der Unterschied nur geringfügig erkennbar ist (im Mittel 2 %), kann er eventuell stellenweise die Differenz zum Trockenfallen ausmachen. Die bereits in den Ganglinien des Sondermessnetzes beobachteten, durch landwirtschaftliche Grundwasserentnahmen verursachten Absenktrichter zeichnen sich in den Simulationsergebnissen nicht nur durch ein Abfallen des Druckwasserspiegels, sondern bereichsweise durch eine Vergrößerung des Grundwasserflurabstands aus, wie ein Vergleich der Rechenläufe ohne und mit genehmigten Grundwasserentnahmen verdeutlichte. Dies wiederum könnte Auswirkungen auf grundwasserabhängige Ökosysteme haben. Verursacht sind die ausgeprägten Absenktrichter durch die in der Bergtheimer Mulde weiträumig vorherrschenden gespannten Grundwasserverhältnisse. Die Entnahme aus Trinkwasserbrunnen unterliegt denselben Bedingungen und trägt ebenfalls zum Druckabfall bzw. zur Erhöhung des Grundwasserflurabstands bei, weist jedoch einen weniger instationären Charakter auf und ist nicht auf die Sommermonate konzentriert.

Die räumliche Ausdehnung und Intensität des Überdruckabfalls sowie ein möglicherweise negativer Einfluss auf Feuchtgebiete und Quellen sollte für ausgewählte Entnahmen mithilfe von Beobachtungen bzw. Messungen vor Ort überprüft und genauer quantifiziert werden. Denkbar sind Pumpversuche (ggf. auch Gruppenpumpversuche) bei gleichzeitiger Beobachtung von Abflüssen bestimmter Oberflächengewässerabschnitte und Quellschüttungen im näheren Umfeld sowie von Wasserständen benachbarter Brunnen und Grundwassermessstellen.

Hinsichtlich einer Optimierung der landwirtschaftlichen Grundwasserentnahmen besteht letztendlich ein gewisser Deutungsspielraum. Einerseits wirken sich weder die tatsächlichen, noch die genehmigten Entnahmemengen und höchstwahrscheinlich auch keine geringfügige Steigerung der momentanen Wasserrechte merklich auf die Gesamtbilanz oder die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände aus. Andererseits besteht durchaus Anlass zur Annahme, dass die kumulierende Wirkung benachbarter Grundwasserentnahmen eine zusätzliche Beeinträchtigung der im Sommer bereits durch Trockenheit gestressten, grundwasserabhängigen Ökosysteme bedeutet (besonders für Quellen oder Fließgewässerabschnitte, welche von den genutzten Grundwasserleitern gespeist werden). Wie im Informationsband *„Niedrigwassermanagement zur Steuerung von Grundwasserentnahmen am Beispiel der landwirtschaftlichen Bewässerung“* beschrieben, bedeutet das in der landwirtschaftlichen Bewässerungspraxis häufig beobachtete *„Zusammenfallen maximaler Fördermengen mit Trockenphasen [...] nicht zwingend, dass zeitgleich auch Grundwassertiefstände, minimale Quellschüttungen oder geringe Abflüsse auftreten. Je nach örtlicher Hydrogeologie können diese verzögert bzw. zu einem späteren Zeitpunkt im Herbst oder im Folgejahr auftreten. Meist sind aber bereits in den sommerlichen, trocken-heißen Phasen mit ihren Bedarfsspitzen Auswirkungen der Witterung und der Grundwasserentnahmen auf das Grundwasserniveau und die Fließgewässer zu beobachten (Regierung von Unterfranken, 2020, S. 40).“* Gerade vor dem Hintergrund der prognostizierten Verschärfung der klimatischen Situation, der Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Niederschlagsentwicklung und Extremwetterereignissen und der bereits negativen Grundwasserbilanz ist fraglich, ob die Grundwasserentnahmen in der Bergtheimer Mulde nicht prinzipiell aus Vorsorgegründen reduziert werden müssen.

Überdies sind landwirtschaftliche Grundwasserentnahmen aus gespannten Grundwasservorkommen generell kritisch zu betrachten (LfU, 2019). In Anbetracht der komplexen Geologie

des Unteren Keupers und der gespannten Grundwasserverhältnisse ist es schwierig die Auswirkungen einzelner Entnahmen auf das System, z. B. auf einige der zahlreich vorhandenen (Schicht)quellen, abzuschätzen oder nachzuweisen. Die Ausprägung der entnahmebedingten Effekte hängt stark von den lokalen Gegebenheiten ab.

Die Bergtheimer Mulde ist durch ihre „Schüsselform“ als ein zusammenhängendes, hydrogeologisches System anzusehen und durch das Bilanzgebiet (= zentrales Aussagegebiet) repräsentiert. Eine weitere Unterteilung etwa entlang von Verwaltungsgebietseinheiten wird nicht für sinnvoll erachtet. Durch eine Verlagerung der Entnahmen innerhalb dieses zusammenhängenden Gebiets kann keine Erholung der Wasserbilanz erfolgen (Stichwort: geeignete Brunnenstandorte).

Das LWHM eignet sich als Instrument, um in weiteren Rechenläufen mit veränderten Bedingungen das Verständnis für die Landschaft auszubauen und Managementoptionen durchzuspielen. Klimatische Parameter könnten nochmals schrittweise variiert werden. Versuchsweise könnten die Entnahmen zeitlich homogenisiert auf die regenreicheren Wintermonate verteilt werden. Vertreter der Landwirtschaft vor Ort unterbreiteten bereits den Vorschlag das Grundwasser in feuchteren Zeiten zu entnehmen und zwischenzuspeichern, falls dies wasserwirtschaftlich wünschenswert wäre (*Gespräch zw. WWA AB und Vertretern des Bewässerungsverein Bergtheimer Mulde e.V., 24.02.2022*). Dafür müssten die Gesamtentnahmen allerdings aufgrund zusätzlicher Verdunstung leicht aufgestockt werden.

Auch die Simulation von Landnutzungsszenarien, die auf Verdunstungsminderung, verstärkte Tiefensickerung und einen optimierten Wasserhaushalt hinwirken können, wären mit dem LWHM zu bewerkstelligen (wenn auch mit größerem Aufwand). In diesem Sinne wäre z. B. der Effekt eines erhöhten Gehölzanteils in der Landschaft oder von im Keyline-Design bewirtschafteten Ackerflächen (*Gerhardt, 2022*) zu untersuchen.

Für lokal belastbare Aussagen sind bereichsweise Modellverfeinerungen erforderlich (sog. Modelllupen). In diesem Fall müssen jedoch auch die Input-Daten räumlich und zeitlich höher aufgelöst vorliegen.

Generell sind das für die Bergtheimer Mulde als Pilotgebiet entwickelte, gekoppelte Landschaftswasserhaushaltsmodell, das genutzte Modellinstrumentarium, die Modellierungs- und Auswertemethoden auf andere Gebiete und ähnliche Fragestellungen übertragbar.

12. Literaturverzeichnis

- Anderson, D. J., Flocard, F., & Lumiatti, G. (2018). *Predicting drawdown in confined aquifers: Reliable estimation of specific storage is important*. Sydney: UNSW Sydney - Water Research Laboratory.
- BAH und gIR. (2011). *Handlungskonzept für die Stabilisierung der Grundwasserverhältnisse in der Lieberoser Hochfläche im Rahmen der Umsetzung der EU-WRRL - Endbericht*. Abgerufen am 26. 05. 2021 von Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz: https://mluk.brandenburg.de/media_fast/4055/lieberose_end1.pdf
- BAH und R&H Umwelt. (2021). *Erstellung eines Landschaftswasserhaushaltsmodells für die Bergtheimer Mulde nördlich von Würzburg*. Berlin, München, Nürnberg: Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg.
- Becker, A. K. (2002). The Hydrological Modelling System ArcEGMO. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, 321-384.
- BGI - Beratende Geolingenieure GbR. (06.03.2017). *Hydrogeologischer Bericht - Errichtung der Brunnen B1 und B2, Pumpversuch vom 23.02. bis 24.02.2017 in Schemau (Stadt Dettelbach, Landkreis Kitzingen)*. Würzburg: [REDACTED]
- Regierung von Unterfranken. (2020). *Niedrigwassermanagement zur Steuerung von Grundwasserentnahmen - am Beispiel der landwirtschaftlichen Bewässerung*. Würzburg: Regierung von Unterfranken.
- DVGW. (2016). *Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 107 (A) - Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten*. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- DWD. (2020). *Nationaler Klimareport*. Potsdam: Deutscher Wetterdienst. Von https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report_aufgabe-4.pdf?__blob=publicationFile&v=11 abgerufen
- Guse, B., Pilz, T., Stoelzle, M., & Bormann, H. (2019). Charakterisierung und Analyse hydrologischer Modelle im deutschsprachigen Raum. (A. u. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Hrsg.) *Wasser und Abfall*(5), S. 43-52. Abgerufen am 09. 02. 2022 von http://www.hydro.uni-freiburg.de/publ/pubpics/guse_2019
- Gerhardt, P. (26. 01. 2022). Wege in eine klimagerechtere Landwirtschaft. *Hochwasserschutz ist Dürreschutz ist Bodenschutz - Mehrwert von Agroforst und Regenerativer Landwirtschaft für Landwirt:innen und Gemeinden*. Online-Veranstaltung, Bayern: Öko-Modellregion Oberes Werntal.
- Gramlich, A., Stoll, S., Aldrich, A., Stamm, C., Walter, T., & Prasuhn, V. (2018). *Einflüsse landwirtschaftlicher Drainage auf den Wasserhaushalt, auf Nährstoffflüsse und Schadstoffaustrag - Eine Literaturstudie*. Zürich: Eidgenössisches Department für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF Agroscope. Abgerufen am 09. 03. 2022
- Heath, R. C. (1988). *Einführung in die Grundwasserhydrologie*. München: R. Oldenbourg Verlag München Wien 1988.
- Herzog, F., & Kunze, J. (1999). Erfassung von Parametern des Landschaftswasserhaushalts. In H. Horsch, & I. Ring, *Naturressourcenschutz und wirtschaftliche Entwicklung - Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung im Elbeinzugsgebiet* (S. 89-108). Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., . . . Woldt, M. (2017). *ReKliEs-De - Ergebnisbericht*. doi:doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- Karlsruher Institut für Technologie. (o. D.). *Klima und Extremereignisse*. Abgerufen am 24. 01. 2022 von Süddeutsches Klimabüro Website: <https://www.sueddeutsches-klimabuero.de/impressum.php>
- Klöcking, B. (2009). *Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO*. Von ArcEGMO - Das hydrologische Modellierungssystem: <http://www.arcegmo.de/PSCN.pdf> abgerufen
- Klöcking, B., Wenske, D., Knab, G., Pfützner, B., Reinicke, F., & Ihling, H. (2018). ReArMo – Ein Modellverbund zur Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*(39/18), 215-225.
- LfU. (2012). Mittlere jährliche reale Verdunstung in Bayern 1981-2010, 1:500.000. *Karten der Wasserwirtschaft*. Bayern, Deutschland: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU. (2018a). Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss in Bayern 1981-2010, 1:500.000. *Karten zur Wasserwirtschaft*. Bayern, Deutschland: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU. (2018b). Mittlerer jährlicher Niederschlag in Bayern 1981-2010, 1:500.000. *Karten zur Wasserwirtschaft*. Bayern, Deutschland: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU. (2019). *Wasserentnahmen für Bewässerungszwecke - Begutachtungspraxis*. Abgerufen am 09. 02. 2022 von Bayerisches Landesamt für Umwelt - Wasserentnahmen für die Bewässerung: <https://www.lfu.bayern.de/wasser/bewaesserung/doc/begutachtungspraxis.pdf>
- LfU. (2021a). *Arbeitshilfe - Klimawandel und kleine Gewässer*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU. (2021b). *Veränderungen des Klimas*. Abgerufen am 21. 01. 2022 von Bayerisches Klimainformationssystem: <https://klimainformationssystem.bayern.de/klimaentwicklung/veranderungen-des-klimas>
- LfU. (2021c). *Klima-Faktenblätter Bayern und Mainregion - Klima der Vergangenheit und Zukunft*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Mey, S., Albert, H., Hildebrand, C., & Pfützner, B. (2008). Modellgestützte Analysen zur Stabilisierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet des Moores „Luchsee“. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*(52/6), S. 310-318.
- Monninkhoff, B., Koch, T., & Pfützner, B. (2012). Gekoppelte Modellierung zur Reduzierung von grundwasserbedingten Hochwasserschäden im Großraum Paulinenaue, Brandenburg. *Beitrag zur FH-DGG-Tagung Dresden, 17. Mai 2012*.
- Neumann, J. (10. 05. 2021). Faktencheck: Die aktuelle Grundwassersituation in Unterfranken. *15. Wasserforum Unterfranken*. Würzburg, Bayern, Deutschland: LfU, Ref. 92.
- Pfützner, B. (2002). *Modelldokumentation ArcEGMO*. Von ArcEGMO - Das hydrologische Modellierungssystem: <http://www.arcegmo.de> abgerufen
- Pfützner, B., Mey, S., Nützmann, G., & Scheffler, E. (2006). Modellgestützte Analyse des Gebietswasserhaushaltes für ein Einzugsgebiet im Berliner Nord-Osten. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*(50/1), S. 12-19.
- Schönbein, D. (2020). *Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert*. Abgerufen am 21. 01. 2022 von Klimabericht für Unterfranken: <https://bigdata-at-geo.eu/klimabericht/#/06-klimaprojektionen-f%C3%BCr-das-21-jahrhundert>
- WWA AB. (2018). *DATENBLATT PROJEKTANTRAG – Etablierung und Betrieb eines Landschaftswasserhaushaltsmodells für die Bergtheimer Mulde*. Aschaffenburg.
- WWA AB. (2021). *Recherche und Management von Grundlagendaten im Projekt „Landschaftswasserhaushaltsmodell Bergtheimer Mulde“*. Aschaffenburg: Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg.

Impressum:

Herausgeber:

Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg
Cornelienstraße 1
63739 Aschaffenburg
Telefon: +49 6021 5861-0
E-Mail: poststelle@wwa-ab.bayern.de
Internet: www.wwa-ab.bayern.de

Bearbeitung/Text:

Fr. Julia Weiß, FB W

Stand:

März 2022