

Büro für Angewandte Hydrologie (AN)
Berlin und München



In Zusammenarbeit mit der

R & H Umwelt GmbH
Nürnberg



Abschlussbericht

an das
Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg (AG)
für die

Erstellung eines Landschaftswasserhaushaltsmodells für die Bergtheimer Mulde nördlich von Würzburg

Bearbeiter:
Dr. Beate Klöcking, Dr. Bernd Pfützner, Mauritius Tix (BAH)
Dr. Katharina Vujevic, Paul Deißinger (R&H Umwelt)

Berlin, München, Nürnberg, 10.12.2021



R&H
UMWELT

Inhaltsverzeichnis

Anlagenverzeichnis	5
Abbildungen	6
Tabellen	10
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Zielstellung	15
2 Datengrundlage	16
3 Methodik und Arbeitsschritte	18
3.1 Modellgrundlagen	18
3.2 Planung und Ablauf der Arbeiten	19
4 Festlegungen zum Modellgebiet, dem Simulationszeitraum und den Schnittstellen zwischen BWHM und GWM	21
5 Grundwasserströmungsmodellierung	22
5.1 Einleitung	22
5.2 Datenbasis	22
5.3 Hydrogeologische Modellvorstellung	22
5.3.1 Geologie und Schichtaufbau	22
5.3.2 Verbreitung der geologischen Einheiten	24
5.3.3 Tektonik	25
5.3.4 Hydrostratigraphische Einheiten	26
5.3.5 Hydraulische Ränder	26
5.4 Modellgebiet	28
5.5 Aufbau Grundwasserströmungsmodell	29
5.5.1 Numerisches Gitter	29
5.5.2 Rand- und Anfangsbedingungen	30
5.6 Umsetzung der hydrogeologischen Modellvorstellung ins numerische Modell	36
5.6.1 Umsetzung Geologie und Schichtaufbau	36
5.6.2 Umsetzung der geologischen Verhältnisse und Tektonik	36
5.6.3 Schichtgrenzen und vertikale Untergliederung	37
5.6.4 Erfassung der Verbreitung der geologischen Einheiten	39
5.7 Parametrisierung	40
5.7.1 Geohydraulische Kennwerte	40
5.7.2 Austausch Grundwasser Oberflächengewässer	41
5.8 Einbindung der Grundwasserentnahmen durch Trink- und Brauchwasserbrunnen	43
5.8.1 Entnahmen aus Trinkwasserbrunnen	43
5.8.2 Entnahmen aus Brauchwasserbrunnen	43
5.8.3 Variation der Entnahmen	46
5.9 Modellkalibrierung	47
5.9.1 Stationäre Kalibrierung	47

5.9.2	Instationäre gekoppelte Kalibrierung	48
5.10	Ergebnisse instationär kalibriertes Grundwassermodell	51
5.11	Zusammenfassung Grundwassermodell	53
6	Bodenwasserhaushaltsmodellierung	55
6.1	Das Simulationsmodell ArcEGMO	55
6.2	Erarbeitung des GIS-Modells für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung	58
6.2.1	Datenbasis und Raumgliederung	58
6.2.2	Fließgewässernetz mit Teileinzugsgebieten	60
6.2.3	Landnutzung	61
6.2.4	Bewirtschaftung der Ackerflächen	63
6.2.5	Böden	66
6.2.6	Meteorologische Daten	69
6.2.7	Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen	71
6.3	Aufbau und Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodelles	77
6.4	Test des ungekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodells	78
6.4.1	Abbildung der klimatischen Situation	78
6.4.2	Ergebnisse der Boden-Wasserhaushaltssimulation	81
6.4.3	Gewässerabflüsse	89
6.5	Zusammenfassung BWHM	91
7	Kopplung BWHM-Grundwasserströmungsmodell	92
7.1	Programmtechnische Umsetzung	92
7.2	Gebietsspezifische Kopplung der Modelle	94
7.3	Anwendung	94
8	Untersuchungen zum Landschaftswasserhaushalt	96
8.1	Gekoppelte Modellierung des Ist-Zustandes (S0)	96
8.1.1	Ergebnisse Oberflächengewässer	96
8.1.2	Ergebnisse Bodenwasserhaushalt und Wasserhaushaltsgrößen	98
8.1.3	Ergebnisse Grundwasserhaushalt	100
8.2	Sensitivitäts- und Szenarioanalysen mit dem gekoppelte LWHM	104
8.2.1	Vorstellung der Szenarien	104
8.2.2	Änderung des Gebietswasserhaushalts unter den Szenariobedingungen	106
8.2.3	Einfluss der Bewässerungslandwirtschaft auf Verdunstung und Versickerung	108
8.2.4	Änderung des Grundwasserhaushalts unter Szenariobedingungen	112
8.2.5	Einfluss der Bewässerungslandwirtschaft auf Grundwasserbilanzen und Grundwasserstände	113
8.2.6	Änderung der Gewässerabflüsse unter den Szenariobedingungen	118
8.2.7	Änderung der Grundwasserspiegel	124
8.3	Analysen zur Bilanzierung des Grundwassers im Unteren Keuper	128
9	Modellbewertung und Ausblick	135
10	Literatur	138

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Lagepläne
Anlage 1.1	Übersichtslageplan
Anlage 1.2	Modellgebiet
Anlage 2	Modellaufbau
Anlage 2.1	Änderungen Streichlinienkarte Oberer Muschelkalk/Unterer Keuper
Anlage 2.2	Vergleich geologische Profile – Modellschnitt
Anlage 3	Modellgrundlagen und Datenaufbereitung
Anlage 3.1	Aufstellung Trinkwasserbrunnen
Anlage 3.2	Aufstellung Brauchwasserbrunnen
Anlage 4	Ergebnisse Grundwassermodell
Anlage 4.3	Ganglinien Doppelmessstellen instationäre Kalibrierung
Anlage 4.4	Wasserspiegeländerung über den Modellzeitraum - Ganglinien
Anlage 4.5	Wasserspiegelvergleich am Ende des Modellzeitraums – Differenzenpläne
Anlage 4.6	Darstellung Zu- und Abflusskomponenten
Anlage 5	Weitere Ergebnisse in elektronischer Form

Abbildungen

Abbildung 1:	Verbreitung der geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet. Anmerkung: Zur Darstellung der Fortsetzung des Unteren Keupers südlich der Rimpar-Kürnach-Störungszone, ist der Unsicherheitsbereich Süd dargestellt jedoch nicht im Modell umgesetzt.	24
Abbildung 2:	Grundwasserleiter im Unteren Keuper (ARGE igi Niedermeyer Institute - Univ. Prof. Dr. P. Udluft, 1998).....	26
Abbildung 3:	Geändertes Modellgebiet	28
Abbildung 4:	Numerisches Gitter und Gitterverfeinerung.....	29
Abbildung 5:	Randbedingungen entlang des Modellrandes.....	30
Abbildung 6:	Verschneidung des 50 x 50 m Raster der Grundwasserneubildung aus dem BWHM mit den dreieckigen Elementarflächen der GW-Modells.	31
Abbildung 7:	Gewässernetz Grundwassermodell	32
Abbildung 8:	Aufbau 3D-Grundwassermodell mit Darstellung der Grundwasserstände	35
Abbildung 9:	Ausschnitt der Streichlinienkarte OK Oberer Muschelkalk mit Anpassungen durch R&H Umwelt inklusive Hilfslinien zur Interpolationshilfe zur besseren Darstellung des Störungsversatzes.....	37
Abbildung 10:	Verteilung Leakage-Faktoren der Oberflächengewässer, links: Out-Transfer, rechts: In-Transfer	42
Abbildung 11:	Grundwasserförderung Wasserversorger im Modellgebiet.....	43
Abbildung 12:	Prozentualer monatlicher Anteil an der jeweiligen Jahresentnahme berechnet aus allen Brauchwasserbrunnen für die Jahre 2015, 2016 und 2017 für die instationäre Kalibrierung.	44
Abbildung 13:	Zweigliedrige Verteilungsfunktion zur Generierung von monatlichen Entnahmemengen aus den jährlich übermittelten Grundwasserentnahmen für das Grundwassermodell.....	45
Abbildung 14:	Verteilungsfunktion der frühen Jahre 2004 – 2010 für das instationäre Grundwassermodell mit und ohne Winterentnahmen.	45
Abbildung 15:	Grundwasserförderung Brauchwasserbrunnen im Modellgebiet nach Brunnengruppen.....	46
Abbildung 16:	stationäre Kalibrierung, Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten, Grenzdolomit	47
Abbildung 17:	stationäre Kalibrierung, Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten, Werksandstein.....	47
Abbildung 18:	Ergebnis stationäre Kalibrierung gemessene vs. gerechnete Wasserspiegel.....	48
Abbildung 19:	Bandbreite der kf-Variation im Rahmen der instationären Kalibrierung.....	48
Abbildung 20:	Grundwassergleichen Ende 2019 im kuD (links) und kuW (rechts).....	51
Abbildung 22:	Grundwasserflurabstand in Metern	52
Abbildung 21:	Effluente (positiv) und influente (negativ) Verhältnisse an den Gewässern	52
Abbildung 23:	Modellkomponenten in ArcEGMO und Schnittstellen zu externen Programmen	55
Abbildung 24:	Simulation der Abflussbildung in ArcEGMO-PSCN	56
Abbildung 25:	Räumliches Aggregierungsschema von ArcEGMO	57
Abbildung 26:	Raumgliederung von BWHM und Grundwassermodell (GWM), Detail im Gramschatzer Wald.....	59
Abbildung 27:	Fließgewässer, deren Einzugsgebiete und Abflusspegel der 1. Bearbeitungsstufe BWHM	60

Abbildung 28:	Landnutzung im Untersuchungsgebiet.....	61
Abbildung 29:	Zentralbereich des Untersuchungsgebietes mit Managementtypen der Ackerflächen....	63
Abbildung 30:	Bodentypen im Untersuchungsgebiet mit Unsicherheitsbereichen (AB: Vega, BB: Braunerde).....	66
Abbildung 31:	Profiltiefe (links) und gesättigte Leitfähigkeit kf des untersten Bodenhorizonts	68
Abbildung 32:	Lage der erfassten Klimastationen und REGNIE-Niederschlagsraster	70
Abbildung 33:	Brauchwasserbrunnen (Sterne), Brunnengruppen (Kreise) und aggregierte Flurstücke mit Zuordnung zu einer Brunnengruppe (eine Farbe pro Brunnengruppe, Brunnengruppe in Grün) bei Unterpleichfeld.....	72
Abbildung 34:	Modellkonzept zur Berechnung des aktuellen Bewässerungsbedarfs.....	74
Abbildung 35:	Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über alle Brunnen.....	75
Abbildung 36:	Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über die Brunnen der Brunnengruppe 6	75
Abbildung 37:	Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über die Brunnen der Brunnengruppe 7	76
Abbildung 38:	Niederschlag [mm/a] und Lufttemperatur im Mittel 2005-2019	78
Abbildung 39:	Vergleich der Niederläge der RegNie-Zelle RN 384576 mit den Messwerten der AMD Seligenstadt.....	79
Abbildung 40:	Lufttemperatur, Niederschläge und KWB als Monatsmittel in den beiden Perioden	79
Abbildung 41:	Gegenüberstellung der Lufttemperaturen, Niederschläge und KWB als Monatsmittel in den beiden Perioden	79
Abbildung 42:	Klimatische Wasserbilanz (KWB), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)	80
Abbildung 43:	Aufteilung der WH-Komponenten (Anteil am Nied.).....	81
Abbildung 44:	Lufttemperatur, Niederschläge und WH-Komponenten als Jahressummen im Gebietsmittel [mm/a], GRV: Grasreferenzverdunstung, EP: potenzielle Verdunstung, ER: reale Verdunstung, RO: Oberflächenabfluss, TKR: Trennkanalisationsabfluss, GWN: Sickerwasser in 2 m Tiefe	81
Abbildung 45:	Tägliche Dynamik der simulierten Abflusskomponenten Sickerwasser in 2 m Tiefe (GWN), Oberflächenabfluss (RO) und hypodermischer Abfluss (RH) für das Gesamtgebiet	82
Abbildung 46:	Gegenüberstellung der GWN und der Bodenfeuchte als Monatsmittel in den beiden Perioden	83
Abbildung 47:	Simulierte Beregnungsmenge (ZW), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)	84
Abbildung 48:	Jährliche Verdunstung (ER), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts).....	85
Abbildung 49:	Simulierte Oberflächenabflüsse (RO, TKR) und Interflow (RH) im Mittel 2005-2019	85
Abbildung 50:	Jährliche Grundwasserneubildung als Sickerwasser in 2 m Tiefe, 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts).....	86
Abbildung 51:	Mittlere Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe [%nFK] (AnFK150), 2005-2014 und 2010-2019..	86
Abbildung 52:	Mittlere Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe [%nFK] (AnFK150) in einem Nass- (2010) und einem Trockenjahr (2018, rechts)	87
Abbildung 53:	Mit GWN-BW simulierte jährliche Sickerwasserbildung (links) und Grundwasserneubildung (rechts), 2005-2018.....	88
Abbildung 54:	Simulierte Abflüsse der Pleichach in Mühlhausen im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen in Würzburg	90
Abbildung 55:	Simulierte Abflussspenden der Kürnach im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen an der Pleichach (Würzburg).....	90

Abbildung 56:	Simulierte Abflussspenden des Schernauer Baches im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen an der Pleichach (Würzburg)	90
Abbildung 57:	Interaktion der Modellteile untereinander und ihre Austauschgrößen (GWH = Grundwasserstand, GWNB = Grundwasserneubildung, Q(GW) = Grundwasserzufluss).....	92
Abbildung 58:	Inhalt des Blocks GwRas2FEFLOW in der modul.ste.....	95
Abbildung 59:	Simulierte Durchflüsse Q der Pleichach in Mühlhausen mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM.....	96
Abbildung 60:	Simulierte Durchflüsse Q der Pleichach in Bergtheim mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM	97
Abbildung 61:	Simulierte Durchflüsse Q des Schernauer Baches mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM	97
Abbildung 62:	Mit dem LWHM berechneter Grundwasserflurabstand (Mittel 2005-2019), Gesamtgebiet, Rand und Zentralbereich mit dortigen Feuchtbiotopen und Verdunstungsdifferenzen (BWHM-LWHM)	99
Abbildung 63:	Abgrenzung Bilanzgebiet (gelb)	100
Abbildung 64:	Grundwasserbilanz Basisszenario S0 - Modellgebiet.....	101
Abbildung 65:	Grundwasserbilanz Basisszenario S0 - Bilanzgebiet.....	101
Abbildung 66:	Wasserspiegelabsenkung im Sommer 2015 im Bereich der Deckschichten (links), im kuD (Mitte) und kuW (rechts)	102
Abbildung 67:	Basisszenario S0 - Ganglinien Grundwasserspiegel	103
Abbildung 68:	Innerjährliche Verteilung der Klimatischen Wasserbilanz KWB als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für die Klima-Szenarien	105
Abbildung 69:	Innerjährliche Verteilung der realen Verdunstung als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für alle Szenarien	107
Abbildung 70:	Innerjährliche Verteilung der Sickerwasserbildung in 2 m Tiefe (GWN) als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für alle Szenarien.....	107
Abbildung 71:	Klassifikation der Bewässerungsflächen hinsichtlich des Anteils von Verdunstungs- bzw. Sickerungsänderung an der Zusatzwassermenge	109
Abbildung 72:	Zusatzwassergaben im Ist-Zustand S0 und Veränderung der Verdunstung und der Sickerwasserbildung gegenüber dem Szenario B1 (keine Bewässerung)	110
Abbildung 73:	Änderung der Grundwasserflurabstände (GWFA) bei Bewässerung mit den genehmigten Mengen (Szenario B2) im Vergleich zum Szenario B1 (keine Entnahmen und Bewässerung), Periode 2010-2019	111
Abbildung 74:	Grundwasserbilanz 2005-2019 Szenarienvergleich.....	112
Abbildung 75:	Ganglinien Doppelmessstellen Szenario B1 und S0.....	115
Abbildung 76:	Ganglinien Doppelmessstellen Szenario B2 und S0.....	116
Abbildung 77:	Differenz der Wasserspiegel zwischen Basisszenario S0 und Szenario B1 ohne GW-Entnahmen (Winter 2019), links kuD, rechts kuW	117
Abbildung 78:	Differenz der Wasserspiegel zwischen Basisszenario S0 und Szenario B1 ohne GW-Entnahmen (Sommer 2019), links kuD, rechts kuW	118
Abbildung 79:	Mittlerer Jahresgang (2005-2019) der Abflüsse an den Pegeln Schernauer Bach – Mühle (53), Pleichach Mühlhausen (163), Kürnach (190) und dem Kontrollpunkt Pleichach Fährbrück (79) für den Ist-Zustand (S0) und den Szenarien Trockenjahre (WS1) und Nassjahre (WS2).....	122
Abbildung 80:	Mittlerer Jahresgang (2005-2019) der Abflüsse an den Pegeln Schernauer Bach – Mühle (53), Pleichach Mühlhausen (163), Kürnach (190) und dem Kontrollpunkt	

	Pleichach Fährbrück (79) ohne Bewässerung (B1) und mit genehmigter Bewässerung (B2).....	123
Abbildung 81:	Lage der Messstellen und Beobachtungspunkte	124
Abbildung 82:	Ganglinien Szenario S0 und S1-1	124
Abbildung 83:	Ganglinien Szenario S0 und S1-2	125
Abbildung 84:	Abweichung der Wasserspiegel für das Szenario S 1-1 vom Basisszenario S0 (Dez 2019), links kuD, rechts kuW.....	125
Abbildung 85:	Abweichung der Wasserspiegel für das Szenario S 1-2 vom Basisszenario S0 (Dez 2019), links kuD, rechts kuW.....	126
Abbildung 86:	Ganglinien Szenario S0 und S2-1	126
Abbildung 87:	Abweichung der Wasserspiegel im kuW für das Szenario S 2-1 (links) und S 2-2 (rechts) vom Basisszenario S0 (Dez 2019).....	127
Abbildung 88:	Ganglinien Szenario S0 und S3-1	127
Abbildung 89:	Reaktion der Grundwasserleiter auf veränderte Neubildungsraten	128
Abbildung 90:	Vergleich der mittels Druckmesssonde (DMS) gemessenen Wasserspiegelschwankungen im kuD an GWM 1 (WUE-ku 1D) und GWM 2 (WUE-ku 1D) mit der berechneten Grundwasserneubildung.....	129
Abbildung 91:	Vergleich der mittleren jährlichen Abweichung der Winterwasserspiegel von Ausgangsjahr 2005 für alle Doppel-GWM und Beobachtungspunkte.....	130
Abbildung 92:	Vergleich Grundwasserbilanzen 2005-2013 und 2014-2019.....	132
Abbildung 93:	Entwicklung der Grundwasserneubildung für den WWA-Amtsbezirk Aschaffenburg (1950-2021)	133
Abbildung 94:	Wasserspiegelvergleich Szenario B2 und S0 im Winter 2019 (kuW)	134

Tabellen

Tabelle 1:	Unterteilung des Unteren Keupers anhand der des Regionalgeologen  verifizierten Bohrprofile.....	23
Tabelle 2:	Dokumentation der Verarbeitung von Brunnendaten.....	33
Tabelle 3:	Umsetzung der geologischen Einheiten im Grundwassermodell.....	38
Tabelle 4:	Hydraulische Kennwerte	40
Tabelle 5:	Abschätzung der In/Out-Transfer Rate anhand der Gewässerstrukturkartierung	41
Tabelle 6:	Basiskarten.....	58
Tabelle 7:	Klassifizierung der ATKIS-Objektarten (AdV, 2008) in Modell-Landnutzungstypen (ID).....	62
Tabelle 8:	Managementtypen (MTyp) mit Flächenanteil und prozentualem Anteil der Hauptfruchtarten [%] und zugeordneter Fruchtfolge (FF)	64
Tabelle 9:	Fruchtfolgen (FF), WiWe: Winterweizen, ZR: Zuckerrübe, ZMais: Zuckermais, KMais: Körnermais	64
Tabelle 10:	Bodenlegenden (LEG) ohne Leitprofil mit Alternativprofil, A: Flächenanteil im Gesamtgebiet, NF: nichtforstlich, F: forstlich, W: Wein.....	67
Tabelle 11:	Klimastationen (GB: geogr. Breite, GL: geogr. Länge)	70
Tabelle 12:	Brunnengruppen BG mit Anzahl n der Brunnen, Gesamtfördermenge (ohne Brauchwasser), Fördermenge März-Oktober, erfasste Bewässerungsmenge und zugeordneten Flächen, Bewässerungsmengen (ZW) als Mittelwerte 2010-2019	73
Tabelle 13:	Lufttemperatur LT [°C] und Wasserhaushaltskomponenten als Jahressummen im Gebietsmittel [mm/a], ZW: Zusatzwasser, GRV: Grasreferenzverdunstung, KWB: Klimatische Wasserbilanz, EP: potenzielle Verdunstung, ER: reale Verdunstung, RO: Oberflächenabfluss, TKR: Trennkanalisationsabfluss, GWN: Sickerwasser in 2 m Tiefe und AnFK [%]: mittlere Bodenfeuchte bis 150 cm Tiefe als Anteil an der nutzbaren Feldkapazität, blau markiert: Nassjahre, rot markiert: Trockenjahre	82
Tabelle 14:	Pegel mit ihren Einzugsgebieten (EZG) und den gemessenen bzw. simulierten mittleren Abflusswerten MR bzw. mittleren Durchflüssen MQ (2005-2019)	89
Tabelle 15:	Überblick über die angesetzten Randbedingungen für die Berechnung des Austauschs zwischen Oberflächengewässern (ArcEGMO) und Grundwasser (FEFLOW)	93
Tabelle 16:	Simulierte gewässerkundliche Hauptzahlen MNQ (mittlerer Niedrigwasserdurchfluss), MQ (Mittlerer Durchfluss) und MHQ (mittlerer Hochwasserdurchfluss) 1.1.2005-31.12.2019.....	98
Tabelle 17:	Grundwasserbilanzen Basisszenario S0, mittlerer Jahreswert und Anteil an Grundwasserneubildung	100
Tabelle 18:	Szenarien zur Sensitivitätsbewertung	104
Tabelle 19:	weitere Szenarien.....	105
Tabelle 20:	Wasserhaushaltsgrößen der einzelnen Szenarien (SZ) als mittlere Jahressumme 2005-2019 [mm/a], ZW: Zusatzwasser	106
Tabelle 21:	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.....	108
Tabelle 22:	Grundwasserhaushaltskomponenten Szenarien	112

Tabelle 23:	Grundwasserhaushaltskomponenten anteilig bezogen auf die Grundwasserneubildung (2005-2019).....	113
Tabelle 24:	Änderung Grundwasserbilanzkomponenten im Vergleich zu Szenario S0.....	114
Tabelle 25:	Simulierte MQ (mittlerer Durchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MQ).....	119
Tabelle 26:	Simulierte MNQ (mittlerer Niedrigwasserdurchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MNQ).....	120
Tabelle 27:	Simulierte MHQ (mittlerer Hochwasserdurchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MHQ).....	121
Tabelle 28:	Anteil der entnahmebedingten Wasserspiegelabsenkung	129
Tabelle 29:	Zusammenfassende Bewertung der Bilanzzeiträume 20015-2013 und 2014-2019	132

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AG	Auftraggeber
AMD	Agrarmeteorologischer Dienst Bayern
ArcEGMO	Hydrologisches Modellierungssystem (Pfützner, 2002)
ÄWP [V%]	Äquivalentwelkepunkt ($pF = 4,2$)
BFI	Baseflow-Index
BWHM	Bodenwasserhaushaltsmodell
d	Tag
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFL	Elementarfläche (Modellierungseinheit in ArcEGMO)
EP	Vegetationskorrigierte potenzielle Verdunstung [mm/Zeitschritt]
ER	Reale Verdunstung [mm/Zeitschritt]
EZG	Einzugsgebiet
F	Forstliche Landnutzung
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FF	Fruchtfolge
FGW	Fließgewässer(-abschnitt)
FK [V%]	Feldkapazität ($pF=1,8$)
GB	Geographische Breite
GIS	Geographisches Informationssystem
GKHZ	Gewässerkundliche Hauptzahlen
GL	Geographische Länge
GOK	Geländeoberkante
GOW	Potenzielle Bewässerungsflächen (Gemüse, Obst, Wein, Saatzucht)
GPV	Gesamtporenvolumen [V%]
GRV	Potenzielle (FAO-Grasreferenz) Verdunstung [mm/Zeitschritt] (auch EP)
GWM	Grundwassermodell
GWFA	Grundwasserflurabstand

GWN	Grundwasserneubildung [mm/Zeitschritt] = Sickerwasser in 2 m Tiefe
GWN-BW	Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell (KLIWA, 2017)
ha	Hektar
Hor	Bodenhorizont (Nummer)
ID	Identifikationsnummer
InVeKoS	Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsystem
kf	Gesättigte Leitfähigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert [mm/d]
KMais	Körnermais
ku	Unterer Keuper
ku1	Untere Tonstein-Gelbbankschichten (Unterer Keuper)
ku2	Obere Tonstein-Gelbbankschichten (Unterer Keuper)
kuD	Grenzdolomit (Unterer Keuper)
kuW	Werksandstein (Unterer Keuper)
LfU	Bayerische Landesamt für Umwelt
LWHM	Landschaftswasserhaushaltsmodell
MHQ	Mittlerer Hochwasserdurchfluss
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserdurchfluss
mo	Oberer Muschelkalk
MQ	Mittlerer Gewässerdurchfluss [m ³ /s]
MR	Mittlerer Abfluss [mm/d]
NF	Nichtforstliche Landnutzung
nFK	Nutzbare Feldkapazität [mm] (pF = 4,2 – 1,8) pro Horizont
nFK150	nFK bis 1,5 m Tiefe [mm]
N, Nied	Niederschlag [mm/ Zeitschritt]
oZW	ohne Zusatzwasser
PSCN	Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model im Rahmen von ArcEGMO (Klöcking, 2009)

REGNIE	1x1 km ² -Niederschlagsraster des DWD (Tagessummen)
RH	Zwischenabfluss, Interflow [mm/Zeitschritt]
RO	Oberflächenabfluss [mm/Zeitschritt]
TG	Teil(einzugs-)gebiet
TKR	Trennkanalisationsabfluss von Siedlungen und Straßen
UG	Untersuchungsgebiet
WHG	Wasserhaushaltsgröße
WiWe	Winterweizen
WiGerste	Wintergerste
WSP	Wasserspiegel
WWA	Wasserwirtschaftsamt
ZMais	Zuckermais
ZR	Zuckerrübe
ZW	Bewässerungsmengen (Zusatzwasser)
ZWB	Zusatzwasserbedarf

1 Zielstellung

Die Bergtheimer Mulde im östlichen Maindreieck ist eine der trockensten Regionen Deutschlands mit einer mittleren Grundwasserneubildungsrate von ca. 60 mm/Jahr (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009). Aufgrund der hier vorherrschenden landwirtschaftlich wertvollen Böden mit hohem Ertragspotential (Löss) wird dieses Gebiet trotz der geringen Niederschläge landwirtschaftlich intensiv genutzt. Besonders die Flächen für den Feldgemüsebau sind in den letzten Jahren stark angewachsen. Wo der Niederschlag für den Anbau von Sonderkulturen zu gering ist, wird der Wasserbedarf häufig durch Wasserentnahmen aus Bewässerungsbrunnen gedeckt. Die Brunnen in der Bergtheimer Mulde erfassen größtenteils die gespannten Grundwasserleiter Grendolomit oder Werksandstein im Unteren Keuper und teilweise kleinere Grundwasservorkommen. Seitens der Landwirtschaft wird die Ausweitung der momentan vergebenen Wasserrechte angestrebt.

Die zukünftige Beurteilung der Wasserentnahmen für Bewässerungszwecke muss neben den Bedürfnissen einer funktionierenden Landwirtschaft auch die Belange des Naturschutzes und den Einfluss des Klimawandels berücksichtigen. Um für die Vergabe neuer Wasserrechte eine Grundlage zu schaffen, wurde von der Regierung von Unterfranken bereits die Erstellung eines Niedrigwassermanagement-Leitfadens in Auftrag gegeben. Darüber hinaus benötigt das Wasserwirtschaftsamt Aschaffenburg als Amtlicher Sachverständiger weitergehende Erkenntnisse zu den hydrogeologischen Verhältnissen und dem landschaftlichen Prozessgefüge in der Bergtheimer Mulde. Dazu sollte im Rahmen dieses Projekts ein Landschaftswasserhaushaltsmodell als Kombination aus numerischem Bodenwasserhaushalts- und Grundwasserströmungsmodell etabliert und betrieben werden. Mit Hilfe dieses gekoppelten Landschaftswasserhaushaltsmodells sollte das langfristig nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot ermittelt und die möglichen Auswirkungen der Entnahmen auf die Kulturlandschaft, den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserverhältnisse erfasst werden. Ziel ist es, mittels dieses Modells künftig die Grundwasserentnahmen unter besonderer Berücksichtigung von Auswirkungen auf den natürlichen Wasserhaushalt zu optimieren und die Modellergebnisse als Grundlage für die Auswahl und Bewertung zukünftiger Brunnenstandorte zu nutzen. Aus den Simulationen und berechneten Szenarien sollten sich Vorschläge zur Optimierung des Betriebs vorhandener Brunnen ableiten lassen.

In den vergangenen eineinhalb Jahren wurde ein dementsprechendes, gekoppeltes Modell entwickelt, das den vorgegebenen Anforderungen entspricht und nun in der Lage ist, relevante Wasserhaushaltsgrößen zeit- und ortsabhängig zu berechnen. Dies umfasst die Parameter Bodenwassergehalt, Sickerwasserrate, Evapotranspiration, Grundwasserstände und -strömungsrichtungen, sowie die oberirdischen und unterirdischen Zustrom- und Abflusskomponenten qualitativ und quantitativ. Des Weiteren kann das Modell Klima- und Landnutzungsszenarien umsetzen und deren Folgen in der Landschaft abbilden. Wie in der Leistungsbeschreibung des AG gefordert worden war, sind Szenariorechnungen durchführbar. Eine erhöhte/verringerte Wasserentnahme aus den Bewässerungsbrunnen, veränderte meteorologische Verhältnisse oder eine variable Kulturartenzusammensetzung/Landnutzungsentwicklung sind genauso darstellbar wie eine Kombination aus mehreren dieser Veränderungen und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Landschaft.

2 Datengrundlage

Zur Erarbeitung des Modells wurde von Seiten des WWA Aschaffenburg folgende Datenbasis in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Nachfolgend wird auf die jeweilige Nummer als Referenz Bezug genommen.

1. Flächen- und Liniendaten in Form von Shapefiles und Rasterdaten:

- (1-1) Topographie (TK 1:25.000, TK 1:50.000, TK 1:100.000) (Raster)
- (1-2) Geländehöhe (1 x 1 m; 5 x 5 m) (Raster)
- (1-3) Hydrogeologische Karte 1:500.000 (hk500) (Raster und Polygonshapefile)
- (1-4) Hydrogeologische Karte 1:100.000 (hk100) (Raster und Polygonshapefile)
- (1-5) Geologische Karte 1:500.000 (gk500) (Raster und Polygonshapefile)
- (1-6) Geologische Karte 1:25.000 (gk25) (Raster und Polygonshapefile)
- (1-7) Schichtlagerungskarten 1:25.000 (Raster und Linienshapefile)
- (1-8) 3D-Modell Maindreieck mit modellierten Isolinien und Schichtflächen der Oberkanten von Muschelkalk (Unterer, Mittlerer, Oberer) und Keuper (Unterer, Mittlerer) sowie Unterkante des fluviatilen Quartärs der Hauptvorfluter und Störungsnetzwerk (.dxf und .txt-Dateien, teilweise Shapefiles)
- (1-9) Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (uebk25) (Polygonshapefile)
- (1-10) Verbreitungspolygone des Quartärs (fluviatil, äolisch, Hangablagerungen)
- (1-11) Grundwassergleichen des Unteren Keupers im Maindreieck (Linienshapefile)
- (1-12) Weitere, kleinräumige Grundwassergleichen zum Unteren Keuper (Raster)
- (1-13) Gewässernetz (Linienshapefile) und Einzugsgebiete Kategorie 05 und 08 (Polygonshapefile)
- (1-14) Nach EG-WRRRL abgegrenzte Grundwasserkörper (Polygonshapefile)
- (1-15) Einzugsgebiete von Trinkwasserfassungen im Amtsbereich des WWA Aschaffenburg (Polygonshapefile)
- (1-16) Flächennutzung nach ATKIS für den Bereich des Modellgebiets (Polygonshapefile)
- (1-17) InVeKoS-Daten für das Untersuchungsgebiet für die Jahre 2005, 2007, 2010, 2013, 2015, 2017 und 2019 (Polygonshapefile)
- (1-18) Gewässerstrukturkartierung 2017 (Linienshapefile)
- (1-19) Untersuchungsgebiet und Unsicherheitsbereiche (Polyon- und Linienshapefile)
- (1-20) Alte Drainagepläne (Raster)
- (1-21) Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung (in jährlicher Auflösung von 1995-2018) aus einer Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW (Polygonshapefile)
- (1-22) Verwaltungsgrenzen

2. Punktdaten in Form von Shapefiles:

- (2-1) Lage von Bohrungen mit plausibilisierten Schichtenverzeichnissen (inkl. Stammdaten, Schichtbeschreibung, Ausbaudaten, hydrogeologische Zuordnung)
- (2-2) Lage von Quellen (inkl. Zustand und Ausbau auf Grundlage der Quellkartierung von 2003-2006)
- (2-3) Lage von Grundwassermessstellen (inkl. Stammdaten, Schichtbeschreibung, Ausbaudaten, hydrogeologische Zuordnung)
- (2-4) Daten der technischen Gewässeraufsicht
- (2-5) Querprofile mit Punktinformationen zu Gewässerabschnitten der Pleichach und der Kürnach (Pleichach: verfügbar ca. ab der Ortschaft Unterpleichfeld stromabwärts bis zum Modellgebietsrand; Kürnach: verfügbar ca. ab der Ortschaft Kürnach stromabwärts bis zum Modellgebietsrand)
- (2-6) Daten Grundwasserstichtagsmessung vom Oktober 2020

3. Quantitative und qualitative Daten:

- (3-1) Daten aus Pumpversuchen (je nach Verfügbarkeit kf-Werte, Transmissivitäten, spezifische Ergiebigkeiten, Aquifermächtigkeiten)

- (3-2) Wasserstandsganglinien an Grundwassermessstellen, Brunnen der Wasserversorgung und lückenhaft Wasserstandsganglinien einiger Bewässerungsbrunnen von Landwirten
- (3-3) Wasserentnahmemengen der Wasserversorgung sowie lückenhaft „tatsächliche“ Entnahmemengen aus den Bewässerungsbrunnen von Landwirten
- (3-4) Genehmigte Wasserentnahmemengen für einzelne Brunnen oder Brunnenanlagen mit mehreren Brunnen
- (3-5) Abflussganglinien und Wasserstände des Pleichachpegels in Würzburg und zukünftig sind Abflussganglinien und Wasserstände der drei in Planung befindlichen Abflussmessstellen innerhalb des Untersuchungsgebiets verfügbar
- (3-6) Bericht: Hydrogeologische Untersuchungen im mittleren Bereich des Maindreiecks unter besonderer Berücksichtigung der Hydrochemie und der hydraulischen Zusammenhänge zwischen Talgrundwasser und Main im Stadtbereich Würzburg. (Stamatis, 1986)
- (3-7) Bodenphysikalische Parameter aus Bodenprofilen (über eine Nummer mit den Haupteinheiten der uebk25 verknüpfbar)
- (3-8) Zwei geologische Querschnitte durch die Bergtheimer Mulde und dazu Verbreitungsgebiete der Grundwasserleiter kuD und kuW in der Bergtheimer Mulde (als Ergebnis einer Voruntersuchung durch einen externen Geologen)
- (3-9) Erläuterungen zu den gk25 der Kartenblätter 6026, 6126 und 6226
- (3-10) Bericht: Hydrogeologisches Gutachten über die Grundwasserverhältnisse im Raum Unterpleichfeld (Geol. Institut Dr. Nuss, 1992)
- (3-11a) Bericht: Wasserversorgung der Gemeinde Bergtheim [...]: Voruntersuchung, Sanierung und Rückbau von Brunnen II (Geowissenschaftliches Büro Dr. Heimbuchner GmbH, 2013)
- (3-11b) Bericht: Wasserversorgung der Gemeinde Bergtheim [...]: Erkundungsbohrung, Hauptbohrung und Ausbau des neuen Brunnen III (Geowissenschaftliches Büro Dr. Heimbuchner GmbH, 2013)
- (3-12) Bericht: Hydrogeologische Untersuchung und Modellierung der Region im Rahmen des wasserrechtlichen Verfahrens zur Erschließung des Grundwassers im Bereich Lengfeld-Estenfeld (mit Abflussmessungen) (ARGE igi Niedermeyer Institute - Univ.-Prof. Dr. P. Udluft, 1998)
- (3-13) Bericht: Abflussmessungen im Rahmen des wasserrechtlichen Verfahrens zu Neufestsetzung eines Trinkwasserschutzgebiets für den Brunnen 2 Versbach (igi Niedermeyer Institute, 1999)
- (3-14) Bericht: Hydrogeologisches Gutachten – Ermittlung der Grundwassereinzugsgebiete Brunnen 1,2,3 des Zweckverbandes Wasserversorgung [REDACTED] (Winter Buchner Aulbach, 2001)
- (3-15) Bericht: Abschlussbericht Hauptbohrung und Ausbau Brunnen I „Riedener Senke“ (Gartiser & Piewak, 1999)
- (3-16) Bericht: Hydrogeologisches Gutachten zur Wasserversorgung [REDACTED], Wassergewinnung Ettleben (BAURCONSULT, 2011)
- (3-17) Bericht: Umweltverträglichkeitsprüfung – Entnahme von Grundwasser aus sieben Brauchwasserbrunnen, Gemarkung Eßleben (BAURCONSULT, 2008)
- (3-18) Bericht: Tektonik und Grundwasserführung in ihrer Beziehung zueinander auf Grund geologischer Aufnahmen in der Umgebung von Würzburg (Ulbrich, 1956)

3 Methodik und Arbeitsschritte

3.1 Modellgrundlagen

Entsprechend der Zielstellung kommen für das Landschaftswasserhaushaltsmodell (LWHM) als Kombination aus numerischem Bodenwasserhaushalts- und Grundwasserströmungsmodell nur räumlich hochauflösende deterministische Modellansätze in Frage, die alle relevanten Wasserhaushaltsprozesse in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen und den anthropogenen Steuerungen berücksichtigen und szenariofähig sind.

Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM)

Als Bodenwasserhaushaltsmodell wird das Modell ArcEGMO-PSCN (s. Kapitel 6.1) genutzt. Dieses hydrologische Modellsystem kann als eigenständiges Landschaftswasserhaushaltsmodell, aber mit den existierenden Schnittstellen zu Grundwasserströmungsmodellen wie MODFLOW oder FEFLOW auch als Teil eines gekoppelten Modells genutzt werden. Dank der enthaltenen detaillierten Boden- und Vegetationsmodelle kann die saisonal wechselnde Wirkung der Vegetation auf den Landschaftswasserhaushalt abgebildet werden. Auch eine Bewässerung bzw. ein Bewässerungsbedarf kann schlag- und termingenau berechnet werden. Aufgrund dieser Modelleigenschaften hat sich dieses Modell bereits in einer Anzahl von Studien zu Anpassungsstrategien der Land- und Wasserwirtschaft unter den Bedingungen des Klimawandels bewährt. So wurde ArcEGMO-PSCN bereits erfolgreich im Rahmen der KLIWA-Fallstudien „Ilz“ (2011), „Mangfall/Attel“ (2015) und „Rhön/Unterfranken“ (2017) angewandt. Positive Erfahrungen liegen außerdem für den Einsatz des Modells für das Bewässerungsmanagement von Weinbergen in Unterfranken vor.

Die zeitliche Auflösung beträgt einen Tag. Die räumliche Auflösung erfolgt polygonbasiert für Hydrotope (Elementarflächen), die durch die Verschneidung der Grundkarten zur Landnutzung, den Bodentypen und den oberirdischen Teileinzugsgebieten generiert werden (Kapitel 6.1). Die Größe dieser Elementarflächen ist von der räumlichen Heterogenität der Teilräume des Modellgebiets abhängig.

Das Bodenwasserhaushaltsmodell übergibt an das Grundwasserströmungsmodell ortskonkret die Versickerungsraten aus der oberen, wechselfeuchten Bodenzone. Daneben werden für alle Elementarflächen die tägliche Verdunstung, die Bildung oberflächennaher lateraler Abflüsse und ggf. ein Bewässerungsbedarf berechnet. Für die im Modell als Linienelemente repräsentierten Vorfluter werden die Abflussganglinien ermittelt, welche für Beobachtungspunkte ausgegeben werden können.

Grundwassermodell (GWM)

Für die gekoppelte Berechnung der Grundwasserverhältnisse kommt die Modellierungssoftware FEFLOW zum Einsatz. Die Vorteile von dieser Software liegen vom mathematischen Standpunkt in der Flexibilität des numerischen Gitters, welches aus Dreieckselementen bzw. Prismen besteht und dadurch sowohl lokale Verfeinerungen zulässt als auch eine gute Anpassung des Gitters an ungleichmäßige Strukturen wie Gewässer.

Im Hinblick auf die spätere Übertragung der Modellbedienung an das Wasserwirtschaftsamt bietet FEFLOW den Vorteil einer graphischen Nutzeroberfläche und eines effizienten Prä- und Postprozessors, sowie einer GIS-Schnittstelle. Dadurch wird sowohl das Hinzufügen und Ändern von Datensätzen, vor allem aber die graphische Aufbereitung der Ergebnisse vereinfacht.

Die zeitliche Auflösung beträgt im instationären Modell analog zum Bodenwasserhaushaltsmodell i.d.R. einen Tag, die räumliche Auflösung des Modellgitters variiert je nach Aussagebereich. Das Grundwassermodell wird anhand der vorliegenden Daten zur regionalen Geologie, des Gewässernetzes sowie der Grundwasserentnahmestellen aufgebaut um anschließend die Grundwasserströmung in Abhängigkeit der aus dem BWHM ermittelten Grundwasserneubildung zu berechnen.

3.2 Planung und Ablauf der Arbeiten

Die Projektbearbeitung erfolgt in Kooperation des Büros für Angewandte Hydrologie Berlin/München (BAH) und R & H Umwelt GmbH (R&H) in enger Zusammenarbeit mit dem WWA Aschaffenburg als Auftraggeber. Dabei ist das BAH eigenverantwortlich für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung, R&H übernimmt die Simulation der Grundwasserverhältnisse. Dementsprechend gliedert sich die Bearbeitung in drei Hauptabschnitte, die im Bericht auch in eigenständigen Kapiteln behandelt werden:

- (1) Bodenwasserhaushaltsmodellierung (BAH) in Kapitel 5
- (2) Grundwasserströmungsmodellierung (R&H) in Kapitel 6 und
- (3) Landschaftswasserhaushaltsmodellierung (BAH und R&H) in Kapitel 8.

Diese Arbeitsteilung erfolgt in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern. Nach Sichtung und Prüfung der vorhandenen Eingangsdaten für die einzelnen Bearbeitungsbereiche erfolgte die Abstimmung von Modellstrategie und die Definition der Rahmenbedingungen für die Modellerstellung. Das betrifft insbesondere die Festlegung des Modellraums und die Vorgaben für das numerische Landschaftswasserhaushaltsmodell, wie die Definition relevanter Modellparameter, der Schnittstellen zwischen BWHM und GWM sowie die Festlegung der Randbedingungen entlang des Modellgebiets. Diese Abstimmung erfolgte parallel mit dem Aufbau von Bodenwasser- und Grundwassermodell (Arbeitsetappe 1) auf der Basis des aktuellen Kenntnisstandes. Als Simulationszeitraum für die Beschreibung des Ist-Zustandes im Untersuchungsgebiet wurde der Zeitraum 01/2005 -12/2019 festgelegt. Wie in der GW-Modellierung üblich, wurde zunächst mit konstanten Randbedingungen ein stationäres Modell erarbeitet, welches den durchschnittlichen Systemzustand darstellt. Darauf aufbauend wurde anschließend die instationäre Berechnung aufgesetzt, welche mit zeitlich variablen Randbedingungen den Wasserhaushalt von 2005 – 2019 abbildet.

Die Projektbearbeitung gliedert sich in folgende Arbeitsetappen:

Modellaufbau

Datenrecherche und Aufbau von Bodenwasser- (Kapitel 6) und Grundwassermodell (Kapitel 5)

Modellkalibrierung/-validierung

Berechnung des Boden- und Grundwasserhaushalts im Untersuchungsgebiet im Zeitraum 2005 - 2019

Modellkalibrierung und –validierung des instationären Modells mit den zur Verfügung stehenden Daten (Wasserstandsganglinien an Grundwassermessstellen und Brunnen und Abflussganglinien des Pleichachpegels in Würzburg), s. Kapitel 6 und 5.

Modellkopplung

Die wechselseitige Kopplung von BWHM und GWM zum LWHM erfolgt über eine räumliche Verknüpfung der Geometrien beider Modelle (Hydrotope/Elementarflächen und Gewässerabschnitte \leftrightarrow finite Elemente, Knoten). Während der Simulation werden dann Zeitschritt für Zeitschritt Daten (Grundwasserneubildung und Grundwasserflurabstand) ausgetauscht, die als Randbedingung für das jeweils andere Modell fungieren.

Das Ziel dieser Modellkopplung ist zum einen die fundierte Erfassung von Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser vor allem in den grundwassernahen Bereichen. Zum anderen reduziert sich der Aufwand für die Bereitstellung dieser Randbedingungen, da ohne eine Softwarekopplung der Datenaustausch dateibasiert erfolgen müsste.

Gekoppelte Modellierung des Landschaftswasserhaushalts

Im Anschluss an die Fertigstellung und Kalibrierung des Landschaftswasserhaushaltsmodells wurden Zeitreihen zu Evapotranspiration, Bodenwassergehalt, Sickerwasserraten, den Gewässerabflüssen an acht ausgewählten Kontrollpunkten der Bäche Pleichach, Kürnach, Brumbach, Grumbach und Schernauer

Bach und zu den Grundwasserständen für den modellierten Zeitraum ausgegeben, ebenso Grundwassergleichen und ihre Veränderung über die Zeit innerhalb des Modellraums. Zudem wurden relevante Bodenwasserhaushaltsgrößen räumlich, über die Ausgabe von Rasterdaten für verschiedene Zeitschritte, dargestellt (z. B. Grundwasserneubildung, Verdunstung, Klimatische Wasserbilanz).

Wasserbilanzen werden nicht nur für die gesamte Modellregion, sondern auch für ein kleineres Bilanzgebiet im Zentrum der Bergtheimer Mulde berechnet, welches zuvor im Rahmen einer Besprechung mit dem AG abgestimmt worden war und als Kernaussagegebiet angesehen werden kann.

Modellanalysen

Nach Abschluss der Untersuchung der gegenwärtigen Wasserhaushaltssituation im Untersuchungsgebiet wurden Vulnerabilitätsstudien hinsichtlich der Klimaveränderungen ausgeführt. Im Zuge einer Sensitivitätsanalyse wurde schrittweise geprüft werden, wie sich Veränderungen im Niederschlag, der Temperatur, der Grundwasserentnahme und im Anteil bewässerter Ackerfläche quantitativ in den Größen des Wasserhaushalts bemerkbar machen. Die dabei generierten Zeitreihen wurden mit den davor für den Ist-Zustand berechneten Zeitreihen verglichen, die unter Eingabe der realen Klima-, Landnutzungs- und Bewässerungsdaten entstanden sind.

Schließlich wurden aufgrund der Berechnungen mit dem aufgesetzten Modell folgende Fragestellungen bearbeitet die Erkenntnisse dokumentiert:

- Wie schnell reagieren die Grundwasserleiter im Unteren Keuper auf klimatische Veränderungen (trockene/niederschlagsreiche Jahre)? Wie verändert sich die Grundwasserneubildungsrate für den Unteren Keuper mit klimatischen Schwankungen?
- 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?
- Wie unterscheiden sich die nicht bewässerten Äcker in der Bergtheimer Mulde von den bewässerten Feldern hinsichtlich Verdunstung und Versickerung (quantitativ und qualitativ)?
- 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?
- Welche jährlichen Grundwasserentnahmemengen sind in der Modellregion mittelfristig nachhaltig nutzbar?
- 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.
- 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).

Ergebnisdokumentation, Daten- und Modellübergabe an den AG

4 Festlegungen zum Modellgebiet, dem Simulationszeitraum und den Schnittstellen zwischen BWHM und GWM

Das Modellgebiet sollte alle für die Betrachtung relevanten Fließsysteme und hydrogeologischen Formationen beinhalten, wobei die Modellgrenzen anhand von hydrogeologischen und im numerischen Grundwassermodell umsetzbare Randbedingungen bestimmt wurden (siehe Anlage 1). Der ursprünglich vom WWA Aschaffenburg vorgeschlagene Umriss des Modellgebietes wurde durch die Projektbeteiligten im Hinblick auf die Aussagekraft für die Fragestellung sowie die Umsetzbarkeit im jeweiligen Modell geprüft und nach Abstimmung mit dem AG angepasst. Dabei wurde der Unsicherheitsbereich Süd wegen der tektonischen Brüche sowie der tief eingeschnittenen Täler ausgegliedert, da diese bewirken, dass hier Teilbereiche des zu simulierenden Unteren Keupers nahezu als „Inseln“ vom übrigen Modellraum hydraulisch abgeschnitten sind. Dadurch bedingt lässt sich eine geringe Relevanz für die Fragestellungen im zentralen Aussagebereich ableiten, was sich auch aus den zur Verfügung gestellten Grundwassergleichen bestätigt. Der neue südliche Modellrand orientiert sich nun an den zur Verfügung gestellten Grundwassergleichenplänen bzw. den daraus abgeleiteten Null-Stromrändern und den Ausstrichen des Unteren Keupers. Der Unsicherheitsbereich Nord wird als solcher weiterhin mitbetrachtet, da sich hier die hydraulische Anbindung an den Hauptmodellraum aus den vorliegenden Grundwassergleichenplänen ableiten ließen.

Zusammengefasst verlaufen die Modelgrenzen weitestgehend entlang der Ränder des Keuper-Grundwasserkörpers sowie im Süden entlang der Rimpär-Kürnacher Störungszone und im Norden z.T. entlang eines anhand des Grundwassergleichenplans bestimmten Nullstromrandes. Das überarbeitete und festgesetzte Modellgebiet stellt die Modellgrenzen gleichermaßen für das BWHM sowie das GW-Modell dar. Der Modellraum ist in Anlage 1 dargestellt.

Die Kalibrierungs- und Validierungszeiträume des Modells sind auf die vorhandenen Zeitreihen (Entnahmedaten und Ganglinien) abgestimmt. Für die stationäre Kalibrierung des GW-Modells wurde eine mittlere Entnahmerate pro Brunnen aus den Jahre 2015-2017 gebildet, da für diesen Zeitraum die Entnahmeraten relativ vollständig vorliegen und dieser meteorologisch einen repräsentativen Durchschnitt darstellt. Der Zeitraum für die instationäre Kalibrierung ist anhand der vorliegenden Ganglinien an den Doppelmessstellen von 2012-2019 gewählt. Die längeren Zeitreihen bieten ebenfalls die Möglichkeit das Modell über eine Teilzeitreihe zu kalibrieren und anschließend über den restlichen Zeitraum zu validieren. Auch wenn teilweise Ganglinien aus landwirtschaftlichen Bewässerungsbrunnen (z.T. vor 2012) vorliegen, wird es als sinnvoll erachtet, die Kalibrierung bzw. Validierung auf möglichst ungestörte Beobachtungsmessstellen zu stützen. Häufig ist für die Aufzeichnungen aus den Brauchwasserbrunnen die Bezugshöhe nicht bekannt oder nicht verlässlich; unplausible Sprünge in den Zeitreihen sind keine Seltenheit und können nachträglich nicht mit Sicherheit korrigiert werden. Daher wurden die Aufzeichnungen zwar mitbetrachtet und für den AG modellierte Ganglinien für die Brunnen ausgegeben, diese jedoch nicht zur Modellanpassung verwendet.

Zusammenfassend wurden für die Modellierung folgende Zeiträume festgelegt:

- Zeitraum für die instationäre Kalibration des GW-Modells: 2012-2019
- Betrachtungszeitraum für das gekoppelte LWHM und Zeitraum zur Charakterisierung des Ist-Zustandes: 2005-2019 (+ ein Jahr zum Einschwingen 2004),

Dabei arbeitet das BWHM mit 1-Tages-Rechenschritten ebenso wie das GW-Modell.

Schnittstelle: Aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell werden die Sickerwasserraten (positiv oder negativ) an das Grundwassermodell übergeben und dort als obere Randbedingung (Grundwasserneubildung) eingesetzt. Da die betrachtete Bodenzone nicht zwangsweise bis zum Grundwasserspiegel, bzw. Grundwasserleiter reicht, wird die Sickerwasserrate auf die oberste simulierte Schicht im Grundwassermodell ausgegeben. Da mit dem Grundwassermodell auch teilgesättigte Bereiche simuliert werden können, kann die verzögerte Neubildung in den unteren Schichten über eine bei Teilsättigung reduzierte hydraulische Durchlässigkeit abgebildet werden.

5 Grundwasserströmungsmodellierung

5.1 Einleitung

Für die zukünftige Beurteilung der Wasserentnahmen in der Bergtheimer Mulde soll ein Landschaftswasserhaushaltsmodell erstellt werden, welches sich aus einem gekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodell und einem Grundwassermodell zusammensetzt.

Für die Grundwasserströmungsmodellierung wird die Software FEFLOW eingesetzt. Das numerische GW-Strömungsmodell wird damit als dreidimensionales Finite-Elemente-Modell aufgebaut. Das schichtbasierte numerische Gitter umspannt das Modellgebiet in horizontaler und vertikaler Richtung und besteht aus 1.108.250 Knoten bzw. 1.972.881 dazwischen aufgespannten Dreieckselemente. Den Elementen werden die hydraulischen Eigenschaften der repräsentierten geologischen Einheit zugewiesen. Die Strömungsvariablen werden für jeden Knotenpunkt des Gitters iterativ berechnet.

Im Grundwassermodell werden ausgehend von den aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell zusickernden vertikalen Flüssen die Grundwasserstände und -strömungsrichtungen berechnet. Dabei werden oberirdischen und unterirdischen Zu- und Abflüsse (Gewässer, Brunnen ...) berücksichtigt.

5.2 Datenbasis

Zur Erarbeitung der (hydro-)geologischen Modellvorstellung des Untersuchungsgebietes sowie zur Erstellung des GW-Modells wurde von Seiten des WWA Aschaffenburg die unter Kapitel 2 aufgeführte Datenbasis in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

5.3 Hydrogeologische Modellvorstellung

Eine ausführliche Beschreibung des Modellgebiets und der bestehenden hydrogeologischen Modellvorstellung auf Grundlage verschiedener Betrachtungen und Untersuchungen aus Teilgebieten des Modellraumes sowie weiterhin bestehende Fragestellungen und Unsicherheiten wurde bereits umfassend in den Ausschreibungsunterlagen dargelegt. Somit wird nachfolgend nur auf die modelltechnisch relevanten Fragestellungen, insbesondere auf die hydraulischen Randbedingungen eingegangen.

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Bergtheimer Mulde, welche im Westen durch den Thüngersheimer Sattel und im Osten durch das Volkacher Gewölbe begrenzt wird. In der Vertikalen umfasst der Untersuchungsraum den Unteren Keuper, sowie die in einigen Bereichen überlagernden Schichten des Mittleren Keupers und aufliegende Deckschichten.

5.3.1 Geologie und Schichtaufbau

Grundlage für die Modellierung ist die geologische Schichtfolge sowie die unterschiedlich ausgeprägten Lithologien im Modellgebiet.

Die Muldenstruktur der Bergtheimer Mulde wird maßgeblich durch die Schichtfolgen des Muschelkalkes im Liegenden des Unteren Keupers geprägt. Die Schichtabfolge aus Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern des Unteren Keupers bildet den zu betrachtenden Modellraum, welche maßgeblich durch die Landwirtschaft sowie lokale Trinkwasserversorgungsanlagen zur Grundwasserentnahme für Bewässerungszwecke genutzt wird.

Überlagert wird der Untere Keuper im Modellgebiet stellenweise durch den Mittleren Keuper sowie durch weitreichende z.T. mehrere Meter mächtige Lößdecken.

Die Erarbeitung und Umsetzung der geologischen Modellvorstellung erfolgte auf Grundlage der geologischen Karten mit Erläuterungen (Datenbasis 1-6,1-10, 3-8, 3-9), Bohrungen im Modellgebiet (2-1, 3-7),

Vorkenntnissen aus der geologischen 3D-Modellierung des Maindreiecks (1-8) sowie die durch den Regionalgeologen erarbeiteten geologischen Schnitte und validierten Bohrprofile (3-8).

Die Erarbeitung ist nachfolgend dokumentiert.

5.3.1.1 Oberer Muschelkalk

Die Modellbasis bildet die Streichlinienkarte der Schichtgrenze Oberer Muschelkalk/Unterer Keuper (Datenbasis 1.7), in welcher die Muldenstruktur der Bergtheimer Mulde sowie die bekannten Störungszonen mit ihren Versatzbeträgen repräsentiert sind. Der Obere Muschelkalk setzt sich aus plattigen Kalksteinen mit Tonsteinlagen zusammen (Freudenberger, Geologische Karte von Bayern 1:25.000 - Erläuterungen zum Blatt 6025 Werneck, 2003). Die Streichlinienkarte ist in Anlage 2 dargestellt.

5.3.1.2 Unterer Keuper

Der Untere Keuper ist laut Erläuterungen zu den Geologischen Karten (Datenbasis 1.6) eine unter stark wechselnden Sedimentationsverhältnissen entstandene Abfolge von hell-dunkelgrauen, dolomitischen oder mergeligen, teils siltigen bis feinsandigen Tonsteinen mit eingeschalteten Silt- und Sandsteinlagen sowie Dolomitstein und Kalksteinbänken und lässt sich lithologisch in 4 Untereinheiten gliedern.

Im Hangenden des Muschelkalks finden sich die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) mit Mächtigkeiten von etwa 16 m. Der ku1 setzt sich im Wesentlichen aus Tonsteinen und -schiefern mit Silt-Sand und Dolomitsteinlagen zusammen.

Darüber folgt der Werksandstein-Bereich (kuW), welcher sich aus feinkörnigen, tonigen Sandsteinen zusammensetzt. Der Werksandstein kann in unterschiedlichen Mächtigkeiten von wenigen Metern bis > 10 m auftreten (Flut-/Normalfazies).

Die überlagernden Oberen Tonstein-Gelbkalkschichten (ku2) bezeichnen Wechsellagerungen von Ton(mergel)steinen mit Kalk- und Dolomitbänken. Mit dem Oberen Sandstein sind auch feinkörnige, tonige Sandsteine in unterschiedlicher Mächtigkeit (ca. 0-8 m) eingeschaltet.

Der gering mächtige, aber harte Grenzdolomit (kuD) bildet das oberste Glied des Unteren Keuper und begrenzt diesen zum Hangenden hin.

Für die vertikale Untergliederung des Unteren Keupers können die Schichtmächtigkeit des ku1, kuW, ku2 und kuD aus den durch den Regionalgeologen verifiziert und anhand von als aussagekräftig eingestuften Schichtgrenzen erarbeitet und pro Untereinheit eine mittlere Mächtigkeit errechnet werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Unterteilung des Unteren Keupers anhand der des Regionalgeologen [redacted] verifizierten Bohrprofile.

	kuD	ku2	kuW	ku1	ku _{ges}
Mittlere Mächtigkeit [m]	2,12	23,34	5,62	15,78	46,68
Minimale Mächtigkeit [m]	1,00	17,50	2,70	13,60	45,00
Maximale Mächtigkeit [m]	5,00	26,00	13,00	17,90	48,10
Anteil an mittlerer Gesamtmächtigkeit des ku	5%	50%	12%	34%	100%

Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Gesamtmächtigkeit des Unteren Keupers mit Schwankungen um lediglich ca. 3 m im Untersuchungsgebiet als relativ gering zu betrachten. Höhere Schwankungsbreiten weisen der Grenzdolomit (kuD), der Werksandstein (kuW) und die Oberen Tonstein-Gelbbankschichten (ku2) auf.

5.3.1.3 Mittlerer Keuper

Im Hangenden des Unteren Keupers finden sich die mehr als 70 m mächtigen Myophorienschichten des Mittleren Keupers. Im Untersuchungsgebiet sind die Myophorienschichten großflächig erodiert und nicht flächendeckend verbreitet. Die feinschichtigen Tonmergelsteine sind gelegentlich von Calcitbändern und Gipsablagerungen durchzogen. Im Untersuchungsgebiet bildet der Mittlere Keuper das jüngste Glied der Trias-Gesteine und stellt keinen nennenswerten Grundwasserleiter dar.

5.3.1.4 Quartär

In weiten Bereichen werden die anstehenden Gesteine des Keupers durch Lössdecken (äolisches Quartär) überlagert.

In den eingeschnittenen Tälern sind quartäre Talfüllungen anzutreffen, welche sich meist aus Sedimenten unterschiedlicher Körnung zusammensetzen. Die Verbreitung des fluvialen Quartärs wurde aus der geologischen Karte abgeleitet (Freudenberger, Geologische Karte von Bayern 1:25.000 - Erläuterungen zum Blatt 6025 Werneck, 2003).

5.3.2 Verbreitung der geologischen Einheiten

Die räumliche Verbreitung der Untereinheiten des Unteren Keupers wurde aus der geologischen Karte erarbeitet und durch Bohrungen aus der Datenbasis 3-8 sowie dem Umweltatlas (Bayerisches Landesamt für Umwelt) verifiziert. In Bereichen, in denen der Ausbiss des Unteren Keupers durch die weiträumig anstehenden Lössdecken überdeckt ist und keine Bohrungen im Übergangsbereich zur Verfügung stehen, unterliegt die räumliche Schichtgrenze einer gewissen Unsicherheit. Zu beachten und für die Umsetzung der Geologie im Grundwassermodell relevant sind die zwei inselförmigen Ausbisse des Oberen Muschelkalks im westlichen Teil des Modellgebiets bei Rupprechtshausen sowie südlich von Erbshausen.

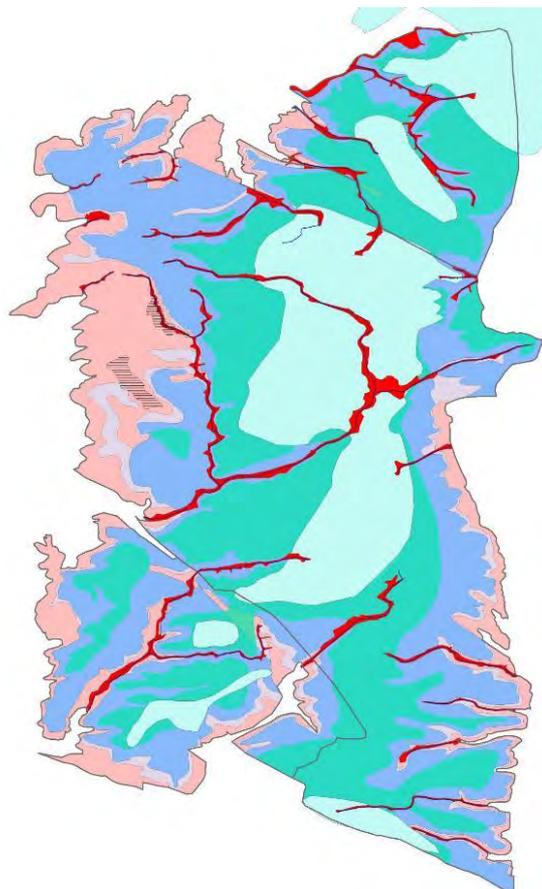
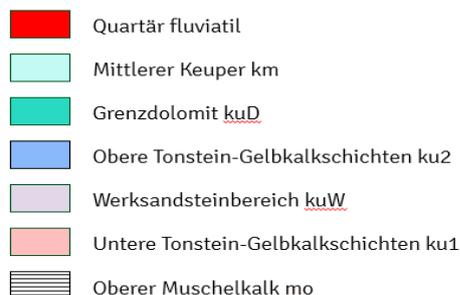


Abbildung 1: Verbreitung der geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet. Anmerkung: Zur Darstellung der Fortsetzung des Unteren Keupers südlich der Rimpf-Kürnach-Störungszone, ist der Unsicherheitsbereich Süd dargestellt jedoch nicht im Modell umgesetzt.

5.3.3 Tektonik

Die namensgebende Muldenstruktur der Bergtheimer Mulde wird aus der Streichlinienkarte anhand der Grenze zwischen Oberem Muschelkalk und Unterem Keuper ersichtlich (vgl. Anlage 2). An der Geländeoberfläche ist die Muldenstruktur nur noch bedingt erkennbar, da die den Muschelkalk überlagernden Schichten im Zentrum der Mulde ihre höchste Mächtigkeit erreichen. Die Schichtgrenze liegt in der Datenbasis 1-7 als Streichlinienkarte vor und wurde von R&H Umwelt überprüft und lokal an neue Erkenntnisse aus aktuelleren Bohrungen sowie der Vorarbeit des Regionalgeologen [REDACTED] angepasst.

Neben der Mulde, welche sich zwischen dem Thüngerheimer Sattel im Westen und dem Volkacher Gewölbe im Osten eintieft, ist das Untersuchungsgebiet vor allem im Norden und Süden (Unsicherheitsbereiche) mit vorwiegend herzynischen Störungszonen durchzogen. Die Störungszonen sind durch die Streichlinienkarte des Oberen Muschelkalks bereits räumlich und mit ihren entsprechenden Versatzbeträgen repräsentiert.

Änderungen zur ursprünglichen Streichlinienkarte ergeben sich in dem durch den Regionalgeologen bereits als Unsicherheitsbereich mit alternativer Schichtlagerung bewerteten Störungsbereich südlich von Seligenstadt. Laut Aussagen von [REDACTED] sowie gemäß der angefertigten geologischen Schnitte sind die Bohrungen mit BIS-ID 6126BG015188 und 6126BG015182 im Bereich nördlich der Störungszonen bei Seligenstadt zwar mit Unsicherheiten behaftet, deuten aber auf eine deutlich tiefer als in der ursprünglichen Streichlinienkarte (Datenbasis 1-7) angegebene Schichtgrenze des Oberen Muschelkalks hin. Dies führt zu einer flacheren und in Richtung Osten weitläufiger ausgeprägten Muldenstruktur im Bereich zwischen Oberpleichfeld und Seligenstadt sowie zu einer erhöhten Aquifermächtigkeit in diesem Bereich.

Eine grundlegende Fragestellung im Modellgebiet ist die hydraulische Funktion der Störungszonen im Modellgebiet und damit die hydraulische Anbindung des zentralen Bereichs der Bergtheimer Mulde an den Unsicherheitsbereich Nord und Süd und damit auch die Absteckung des Bilanzierungsraumes. Diese Einschätzung kann jedoch lediglich anhand der Interpretation der geologischen Karten und der durch den Regionalgeologen [REDACTED] erstellten Profile durch diese Störungszonen sowie der konstruierten Grundwassergleichenpläne erfolgen. Demnach wird die südliche Rimpf-Kürnacher Störungszonen durch ihren hohen Versatz als unterirdische Wasserscheide bzw. hydraulische Barriere eingeschätzt. Ob durch die Störungszonen eine erhöhte Anbindung des Keuper-Wassers an den Oberen Muschelkalk und damit einer erhöhten Leakage besteht, ist nicht auszuschließen, kann jedoch auf Basis dieser Datenlage nicht belegt werden.

Die nördliche Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszonen hingegen zeigt in dem Grundwassergleichenplan des LfU sowie in einem von BAURCONSULT erarbeiteten, kleinräumigeren Grundwassergleichenplan (Datengrundlage 3-17) keine ausgeprägte Barrierefunktion, sodass ein kontinuierlicher Grundwasserfluss im Unteren Keuper vom Hauptmodellgebiet über die Störungszonen im Bereich Rieden in Richtung Eßleben hinweg in den Unsicherheitsgebiet Nord (Richtung Schweinsfurter Mulde) stattfinden kann. Über einen erhöhten Abstrom entlang der Störungszonen in den Oberen Muschelkalk kann auch hier keine Aussage getroffen werden. Somit wird der Unsicherheitsbereich Nord weiterhin als solcher im Modell betrachtet. Eine Grundwasserscheide wie von (Bauer Consult, 2008) aufgezeigt, konnte vorab nur überschlägig geprüft werden, wobei sich zum Stand des Zwischenberichts östlich von Eßleben ebenfalls eine Grundwasserscheide abzeichnet (siehe Anlage 6).

Der Gähnheim-Eßleben wurde im Verlauf der Modellierung im westlichen Teil eine Barrierefunktion zugewiesen, da hier sowohl die teils widersprüchlichen Bohrprofile, sowie auch die Grundwasserspiegel auf eine solche hydraulische Funktion schließen ließen. Gleiches gilt für die Störung westlich von Werneck und Waigolshausen.

Weitere Beschreibungen der im Modell umgesetzten hydrogeologischen Modellvorstellung werden in den nachfolgenden Kapiteln einzeln behandelt.

5.3.4 Hydrostratigraphische Einheiten

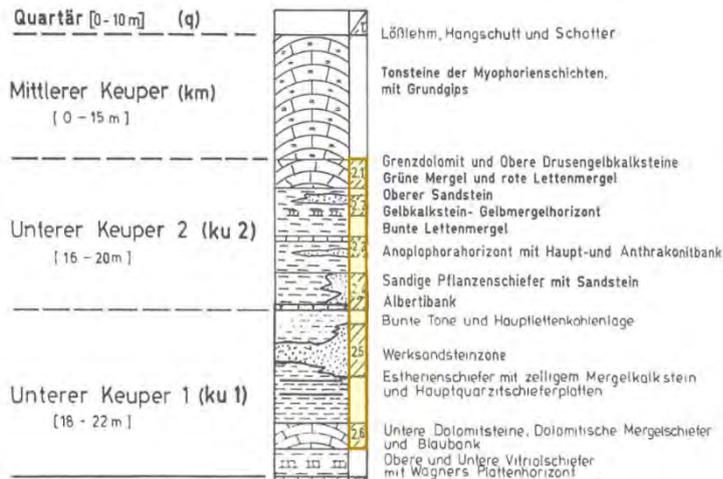


Abbildung 2: Grundwasserleiter im Unteren Keuper (ARGE igi Niedermeyer Institute - Univ. Prof. Dr. P. Udluft, 1998)

Durch die unruhige Lithologie bedingt sowie durch die schnell wechselnden z.T. geringmächtigen Horizonte, verzahnen sich hydrostratigraphisch betrachtet Grundwasser hemmende sowie leitende Horizonte auf engem Raum. Die ausgeprägtesten Grundwasserleiter im Unteren Keuper werden durch den Grenzdolomit (Kluftgrundwasserleiter) sowie dem Werksandsteinbereich (Poren-/Kluftgrundwasserleiter) gebildet, welche weitestgehend als gespannte Grundwasserleiter zu betrachten sind. Durch das WWA Aschaffenburg wurde zur Überwachung des Grundwasserspiegels der beiden o.g. Grundwasserleiter jeweils 6 Doppelmessstellen abgeteuft. Die Beobachtung dieser zeigt, dass sich weitläufig zwei getrennte Grundwasserspiegel ausbilden,

wobei beide dieselbe Grundwasserdynamik jedoch der untere (kuW) in gedämpfter Form aufweisen. Somit ist von einer hydraulischen Verbindung zwischen diesen Horizonten auszugehen. Weitere geringmächtige wasserführende Horizonte werden im ku2 je nach lithologischer Ausprägung u.a. durch den Oberen Sandstein, Anoplophorahorizont sowie den z.T. sandigen Pflanzenschiefer sowie im ku1 durch die Unteren Dolomitsteine gebildet. Diese geringmächtigen wasserführenden Horizonte werden zwar im Untersuchungsraum weitestgehend von oft mischverfilterten Brunnen genutzt, stellen jedoch für die modelltechnische Umsetzung keine flächendeckenden Grundwasserleiter von relevanter Mächtigkeit dar und werden somit in der hydrogeologischen Modellvorstellung tendenziell als Grundwasserstauer betrachtet.

5.3.5 Hydraulische Ränder

Zur Abgrenzung des Modellraums müssen die hydraulischen Ränder bestimmt werden, welche für das Fließgeschehen im Grundwasserkörper der Bergtheimer Mulde (Unterer Keuper) von Bedeutung sind.

Die vorgegebenen Modellränder, welche sich vornehmlich am Ausstrich des Grundwasserleiters (ku1) an den Rändern der Mulde orientierten, wurden mit den vorliegenden Daten abgeglichen und in Teilen angepasst.

Der westliche Modellrand verläuft von Mühlhausen bei Würzburg-Estenfeld über den Gramschatzer Wald bis Ettleben bei Werneck im Norden entlang des Ausstrichs des ku1 und damit entlang der geologischen Grenze des Grundwasserleiters. In diesem Bereich erfolgt kein lateraler Zustrom zum Grundwasserleiter, lediglich ein Abstrom über Quellen bzw. Hangaustritte, sowie eine Entwässerung zum Unterlagernden ist möglich.

Ebenso verhält es sich an der Ostseite des Modellraums zwischen Dipbach östlich von Bergtheim entlang des Dettelbachs bzw. Mains bis nach Mainstockheim/Buchbrunn.

Zwischen Buchbrunn, Rottendorf und Estenfeld verlaufen zahlreiche, hauptsächlich Nordwest-Südost gerichtete Störungen. Aus den zur Verfügung stehenden Grundwassergleichenplänen lässt sich ableiten, dass der Grundwasserfluss im Wesentlichen entlang der Störungen und nicht senkrecht dazu verläuft. Es kann also davon ausgegangen werden, dass ein Grundwasseraustausch zwischen den nördlich und südlich der Störung liegenden Bereichen allenfalls sehr bedingt erfolgt. Die nördlichsten der Störungen zwischen Albertshofen am Main und dem Kreuz Biebelried sowie zwischen Effeldorf und Kürnach und weiter

nach Mühlhausen können daher in guter Näherung als horizontal undurchlässige Ränder angenommen werden.

Für die Störungen im Bereich Eßleben kann die hydraulische Funktion nicht ausreichend aus den verfügbaren Datengrundlagen abgeleitet werden. Die Grenze des Modellraums sollte daher weiter nach Norden verschoben werden und den Unsicherheitsbereich mit einzuschließen. Der nächstgelegene klar definierbare hydraulische Rand ist hier der Main, bzw. die Ausstriche des Unteren Keupers an den Hängen des Maintals. Da dies aber zum einen eine deutliche Ausdehnung des Modellgebiets und außerdem die Einbeziehung der Verwerfungen um Wipfeld bedeuten würde, wurde aufgrund der Entfernung zum geplanten Aussagebereich ein Kompromiss getroffen.

Die Ostseite des nördlichen Unsicherheitsbereichs bis hinunter nach Dipbach orientiert sich an den aus den Grundwassergleichen abgeleiteten Stromlinien die hier als Nullstromrand (kein Fluss quer zu Stromlinien) fungieren. Dadurch, dass es sich hier um randliche Gebiete/Unsicherheitsbereiche handelt, kann eine potentielle Ungenauigkeit an dieser Randbedingung hingenommen werden, da davon auszugehen ist, dass der Einfluss auf den Aussagebereich vernachlässigbar ist.

Ein Grundwasserzustrom von außerhalb in das Modellgebiet ist durch die Wahl der Modellgrenze entlang des Ausstrichs des Unteren Keupers sowie als hydraulisch undurchlässig angenommene Störungszonen bzw. entlang eines Nullstromrandes (siehe Kapitel 5.5.2.1) ausgeschlossen.

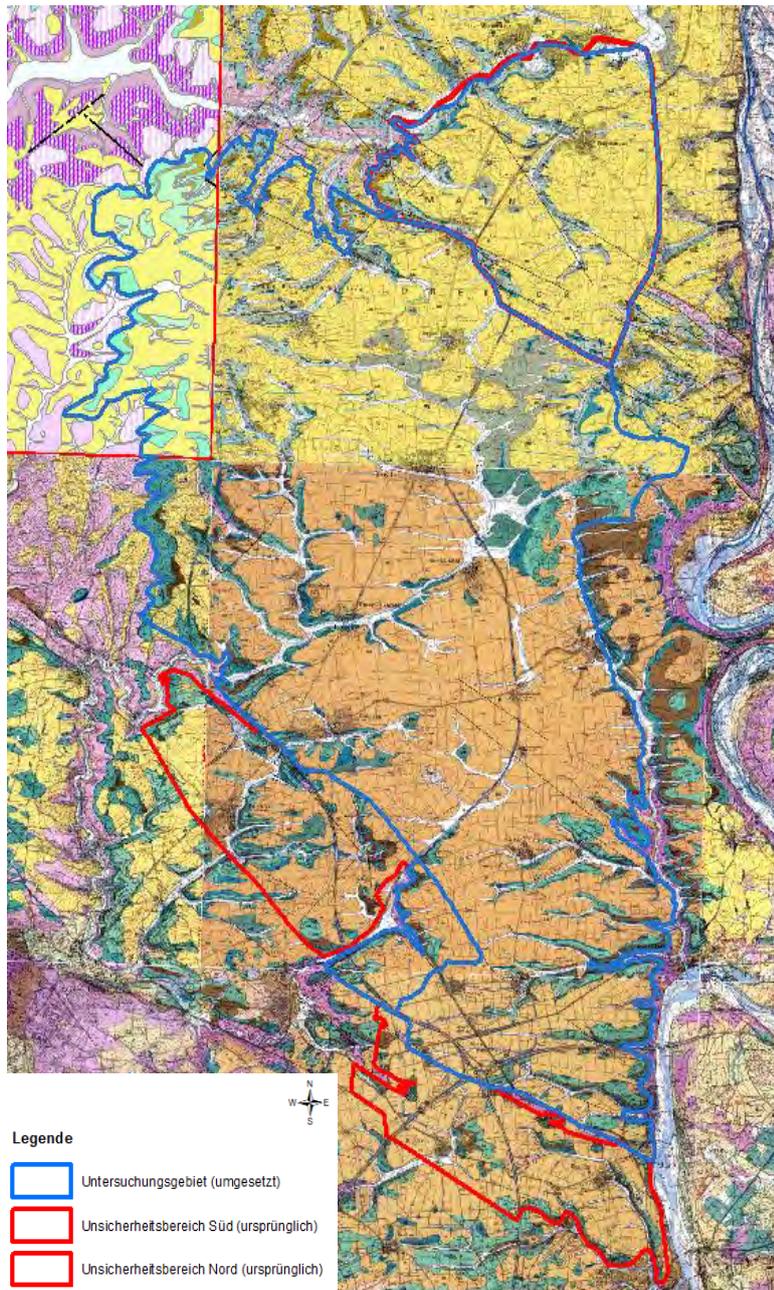
Betrachtet man das Modellgebiet als Kontrollvolumen und Bilanzierungsraum, so erfolgen Wasserzutritte in Form von Grundwasserneubildung als „obere Randbedingung“ sowie innerhalb des Kontrollvolumens ggf. über Teilstrecken der Oberflächengewässer (Grundwasser-Oberflächengewässer-Austausch). Im gekoppelten Landschaftswasserhaushaltsmodell werden die vertikalen Zu- und Abflüsse aus dem Bodenwasserhaushalt flächenspezifisch berechnet.

Die Entwässerung des Modellgebiets und somit des Grundwasserkörpers des Unteren Keupers erfolgt vorrangig auf natürliche Weise über die eingeschnittenen Oberflächengewässer und Schichtquellen.

Über vertikale Fließvorgänge kann Keuperwasser in den Oberen Muschelkalk als „untere Randbedingung“ entwässern. Voruntersuchungen im Bereich von Estenfeld des igi Niedermeyer Instituts (Datenbasis 3-13) konnten über Abflussmessungen und Bilanzierungsrechnungen einen Leakage aus dem Grundwasserkörper des Unteren Keupers in den Oberen Muschelkalk von 0,4-0,6 l/s*km² für den südlichen Modellraum ermitteln.

Außerdem wird Grundwasser aus dem Kontrollvolumen über landwirtschaftliche Brauchwasser- und Trinkwasserbrunnen entnommen.

5.4 Modellgebiet



Die Abgrenzung des Modellgebiets erfolgt entlang von geologischen Grenzen, welche maßgeblich durch den natürlichen Ausbiss des Unteren Keupers als natürliche Begrenzung des Grundwasserleiters sowie durch Störungszone geprägt sind und modelltechnisch durch repräsentative Randbedingungen umgesetzt werden können. Grundlage für die Abgrenzung war zunächst die durch das WWA Aschaffenburg vorgeschlagene Modellgrenze, welche maßgeblich entlang der Grenzen des Keuper-Grundwasserkörpers gemäß Hydrogeologischer Karte 1:100.000 definiert wurde. Das Untersuchungsgebiet ist in einen zentralen Bereich im Zentrum der Bergtheimer Mulde sowie einen nördlich der Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszone angrenzenden „Unsicherheitsbereich Nord“ und einen südlich der Rimpar-Kürnacher Störungszone angrenzenden „Unsicherheitsbereich Süd“ aufgliedert. Nach Prüfung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse bzw. der Evaluierung der Aussagekraft der einzelnen Bereiche für den Wasserhaushalt im zentralen Bereich der Bergtheimer Mulde, wurden durch R&H Umwelt eine Anpassung des Modellgebietes vorgeschlagen und nach Abstimmung mit den Projektbeteiligten im Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) und Grundwassermodell (GW-Modell) umgesetzt.

Abbildung 3: Geändertes Modellgebiet

Da auf Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse und Datenlage das Fließgeschehen im südlichen Unsicherheitsbereich nicht im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt des zentralen Bereiches der Bergtheimer Mulde steht sowie durch die als tendenziell stauend anzunehmende Funktion der Rimpar-Kürnacher Störungszone abgekoppelt ist, wurde der südliche Unsicherheitsbereich aus dem Modellgebiet ausgeschlossen und die südliche Modellgrenze an geologischen Grenzen angepasst. Hinweise hierzu liefert vor allem die durch den Regionalgeologen erarbeiteten geologischen Profile sowie die durch das WWA bereitgestellten Grundwassergleichen des Keupers. Inwieweit diese Störungszone eine Verbindung zwischen dem Keuper-Grundwasserkörper und dem Muschelkalk-Grundwasserkörper darstellt, ist nicht zu beantworten.

Der hydrogeologische Zusammenhang zwischen dem zentralen Bereich der Bergtheimer Mulde und dem nördlichen Unsicherheitsbereich ist ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. Da eine hydrogeologische Verbindung über die Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszone hinweg nach Norden aus den vorliegenden Grundwassergleichenplänen ableitbar ist, ist der nördliche Unsicherheitsbereich weiterhin im Grundwassermodell umgesetzt, aber mit einem gröberen Gitternetz im Modell als Unsicherheitsbereich repräsentiert. Die nördliche Grenze des Unsicherheitsbereich Nord wurde lediglich geringfügig angepasst und auf den Verlauf des Fluss Wern gelegt. Das finale Modellgebiet umfasst damit eine Größe von 245,2 km².

5.5 Aufbau Grundwasserströmungsmodell

5.5.1 Numerisches Gitter

Das numerische Gitter in FEFLOW wird über das sogenannte Supermesh erzeugt. Dabei werden alle wichtigen Modellstrukturen wie Brunnen, Beobachtungspunkte, Gewässerverläufe und Störungszone bereits georeferenziert als Shape in die Gittergenerierung integriert. Somit ist sichergestellt, dass die Modellelemente durch Gitterknotenpunkte exakt vertreten sind. Zur Verbesserung der numerischen Präzision und Stabilität ist das Gitter in Bereichen mit hoher erwarteter Änderung der Grundwasserdynamik (Gewässer, Brunnen, Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszone) sowie dem zentralen Aussagegebiet verfeinert. So ergeben sich Gitterweiten im Nahbereich der Gewässer von ca. 15 m, um Brunnen von unter 0,5 m und in der Modellfläche von 150-200 m. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind die 6 umliegenden Brunnenknotenpunkte um einen Brunnen in Abhängigkeit des jeweiligen Brunnenradius vorverfeinert und wurden bereits in der Netzgenerierung integriert. Dies ermöglicht zwar eine verbesserte numerische Darstellung des

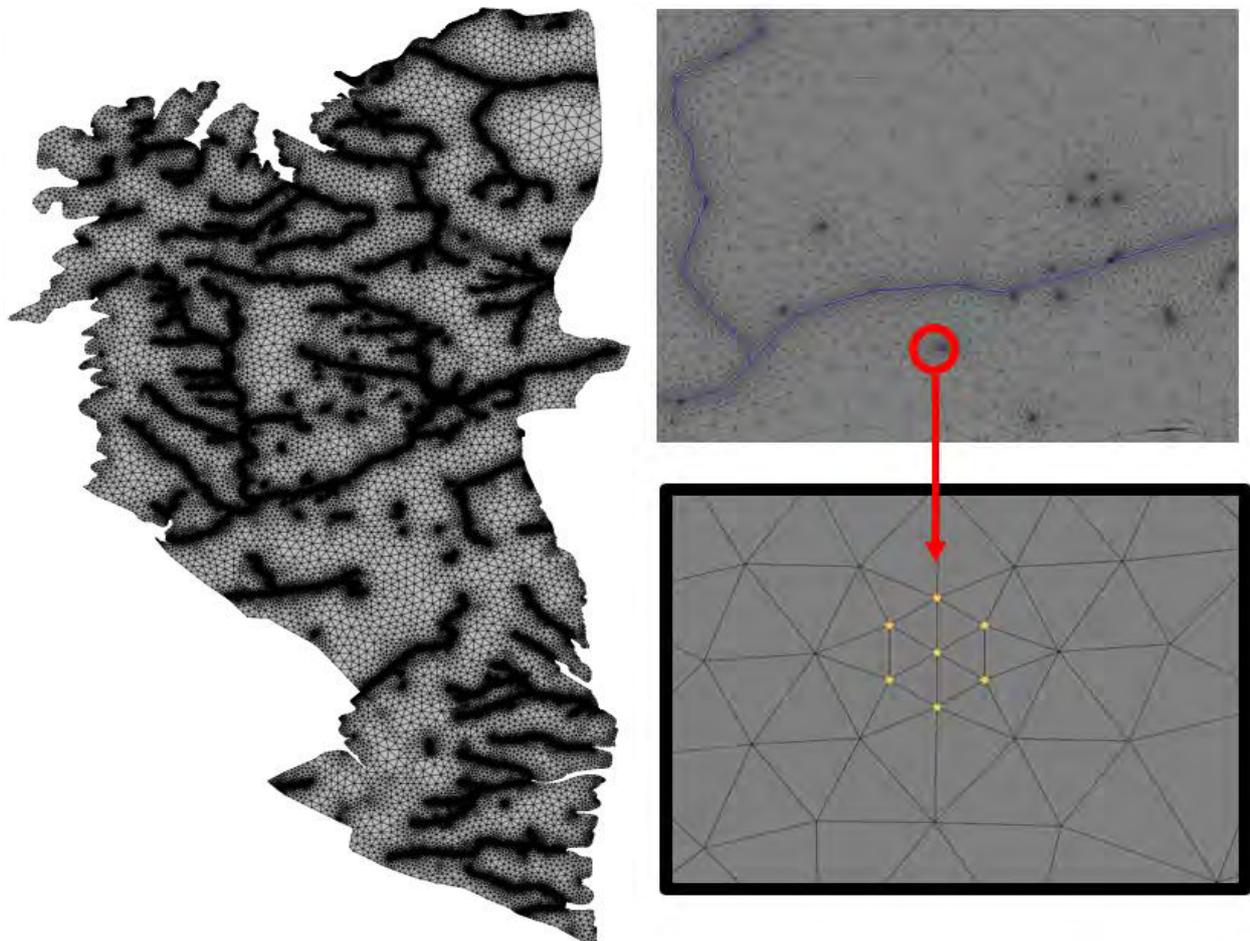


Abbildung 4: Numerisches Gitter und Gitterverfeinerung

Nahbereichs der Brunnen, jedoch ist diese Gittergeometrie beim nachträglichen Hinzufügen von Brunnen in ein bestehendes Modellgitter nur mit gewissem Aufwand zu reproduzieren. Die Abbildung von Absenkt-richtern wird dadurch ggf. im unmittelbaren Brunnenumfeld flacher, Brunnen mit starker Förderung können zu numerischen Instabilitäten führen, sodass die Förderleistung hier verteilt werden muss. Der Unsicherheitsbereich Nord ist mit einer leicht größeren Gitterweite umgesetzt. Durch das gegenüber dem ersten Modellansatz erweiterte Gewässernetz (vgl. 5.5.2.4) hat sich die Anzahl der Gitterknoten für das finale gekoppelte Modell pro Gitterebene auf 110.825 Knoten erhöht (+ca. 14%). Insgesamt ergeben sich für das Grundwassermodell über alle Schichten 1.108.250 Knoten bzw. 1.972.881 Dreieckselemente.

5.5.2 Rand- und Anfangsbedingungen

Für die numerische Berechnung der Grundwasserhöhen an den Knotenpunkten des Gitters sind Randbedingungen vorzugeben, die die Zu- und Abflüsse ins Modellgebiet ermöglichen, bzw. definieren. Außerdem ist allen Modellknoten eine Anfangsbedingung für die Berechnungsvariable (hier Grundwasserstand) als Startwert für die numerische Gleichungslösung vorzugeben.

Für das vorliegende Modell wurden die äußeren Modellränder mit Randbedingungen belegt. Die Grundwasserneubildung, bzw. aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell der gekoppelten Modellierung übergebene Sickerwasserrate, bildet die obere Randbedingung. Als untere Randbedingung wird die Leakage in den oberen Muschelkalk angesetzt.

Ebenfalls als Randbedingung wird der Austausch zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser eingebunden, sowie die Entnahmen aus den Trink- und Brauchwasserbrunnen. Die einzelnen Rand- und Anfangsbedingungen sind nachfolgend beschrieben.

5.5.2.1 Äußerer Modellrand

Der Modellrand verläuft wie unter 5.4 beschrieben entlang natürlicher (hydro-) geologischer Grenzen und ist wie in Abbildung 5 dargestellt als numerische Randbedingungen im Grundwassermodell umgesetzt.

Der Ausbiss des Unteren Keupers ist in FEFLOW als Seepage Face Randbedingung implementiert. Die Seepage Face Randbedingung entspricht einer hydraulic head Randbedingung, wobei das Potential auf Niveau der Geländeoberkante gesetzt wird. Steigt der Wasserspiegel jedoch darüber hinaus an, so wird diese in eine Flux-Randbedingung umgewandelt und erlaubt somit einen Abfluss über den Rand hinaus (Prinzip einer überlaufenden Badewanne). Ein Zufluss über die Seepage Randbedingung ist nicht möglich.

Die Störungszonen sind im Grundwassermodell als No-Flow Randbedingung umgesetzt und sind somit als hydraulisch undurchlässig gesetzt.

Die östliche Modellgrenze des nördlichen Unsicherheitsbereichs verläuft orthogonal zu den Grundwassergleichen des Unteren Keupers (Datenbasis 1-11) und ist somit als Nullstromrand umgesetzt. Am östlichen Modellrand verläuft ein Teilbereich der Modellgrenze (die herausstehende

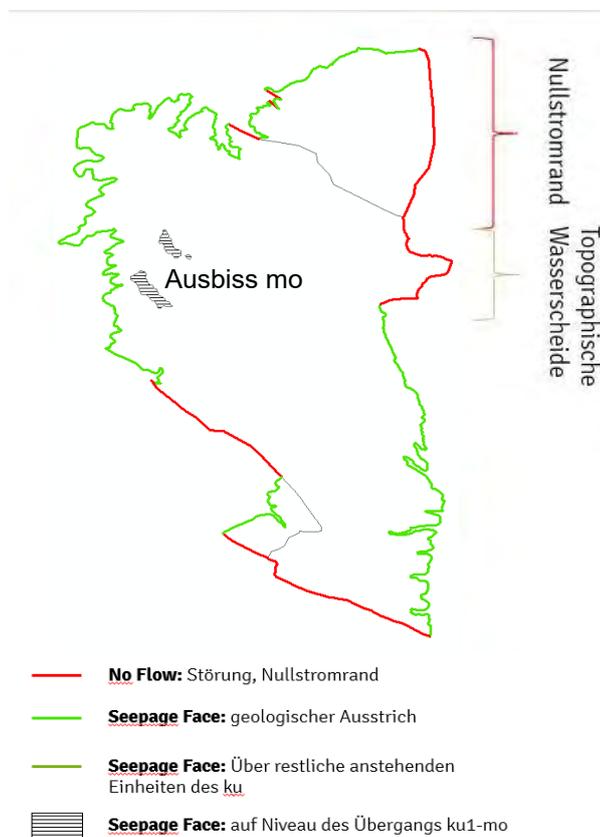


Abbildung 5: Randbedingungen entlang des Modellrandes

„Nase“ – in Abbildung 5) entlang der topographischen Wasserscheide. Hier streicht der Untere Keuper nicht vollständig aus. Dieser Bereich ist als No-Flow – Randbedingung umgesetzt.

5.5.2.2 Grundwasserneubildung

Aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell werden die Sickerwasserraten (positiv oder negativ) in Abhängigkeit der klimatischen Verhältnisse, Bodenparametern sowie Flächennutzung als Raster berechnet und an

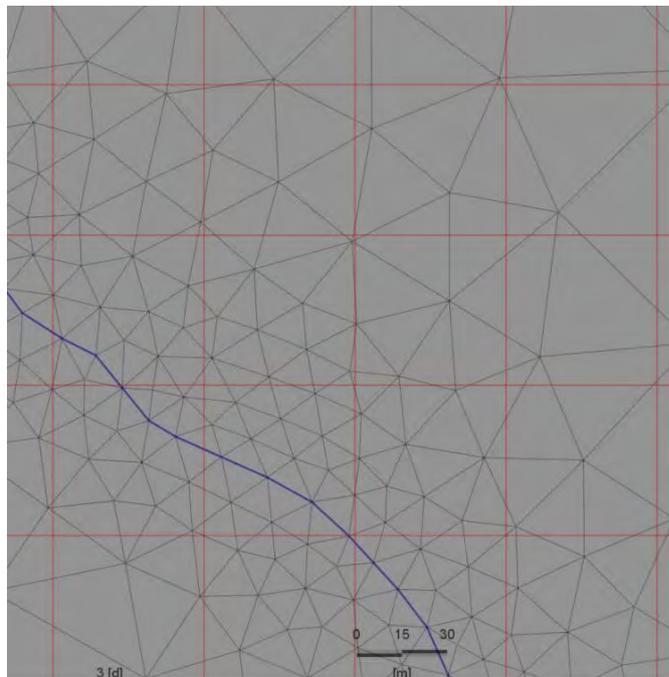


Abbildung 6: Verschneidung des 50 x 50 m Raster der Grundwasserneubildung aus dem BWHM mit den dreieckigen Elementarflächen der GW-Modells.

das Grundwassermodell übergeben und dort als obere Randbedingung (Grundwasserneubildung) eingesetzt. Da die betrachtete Bodenzone nicht zwangsweise bis zum Grundwasserspiegel, bzw. Grundwasserleiter reicht, wird die Sickerwasserrate auf die oberste simulierte Schicht im Grundwassermodell aufgegeben. Nachdem mit dem Grundwassermodell auch teilgesättigte Bereiche simuliert werden können, kann die verzögerte Neubildung in den unteren Schichten über eine bei Teilsättigung reduzierte hydraulische Durchlässigkeit im instationären Modell abgebildet werden.

Bei der Übertragung der Sickerdaten entsprechen die Grundformen der unterschiedlich großen dreieckigen Elementarflächen des Grundwassermodells nicht dem Polygonformat (hier des rechteckigen Rasters) aus dem BWHM.

Die Zuordnung der EFL-bezogenen Sickerwassermengen zu den FEFLOW-Elementen erfolgt über eine flächengewichtete räumliche Mittelung aller EFL, welche ein FEFLOW-Element überschneiden.

5.5.2.3 Leakage des Unteren Keupers in den Oberen Muschelkalk

Voruntersuchungen im Bereich von Lengfeld-Estenfeld des igi Niedermeyer Instituts (Datenbasis 3-13) konnten über Abflussmessungen und Bilanzierungsrechnungen einen Leakage aus dem Grundwasserkörper des Unteren Keupers in den Oberen Muschelkalk von 0,4-0,6 l/s*km² für den südlichen Modellraum ermittelt werden. Dies entspricht bei einer durchschnittlich angesetzten Grundwasserneubildung von ca. 60 mm/a einem Faktor von 20 – 30 % Leakage. Die Größenordnung des ermittelten Werts ist nach eigenen Einschätzungen als plausibel anzunehmen. Im Rahmen der Kalibrierung wurde der Wert jedoch auf 0,2 l/s*km² (=5 mm/a) verringert, was zu einer Optimierung der simulierten Grundwasserstände beitrug. Da zu den Rändern der Mulde die Wassersäule über dem Oberen Muschelkalk abnimmt und der Untere Keuper nur noch teilgesättigt ist, ist hier von einem geringeren hydraulischen Gradienten zwischen Unterem Keuper und Oberem Muschelkalk auszugehen. Zu den Rändern hin wurde der Leakage in den Oberen Muschelkalk daher bis auf 0 verringert, sodass der Schwerpunkt der Leakage um Bergtheim liegt.

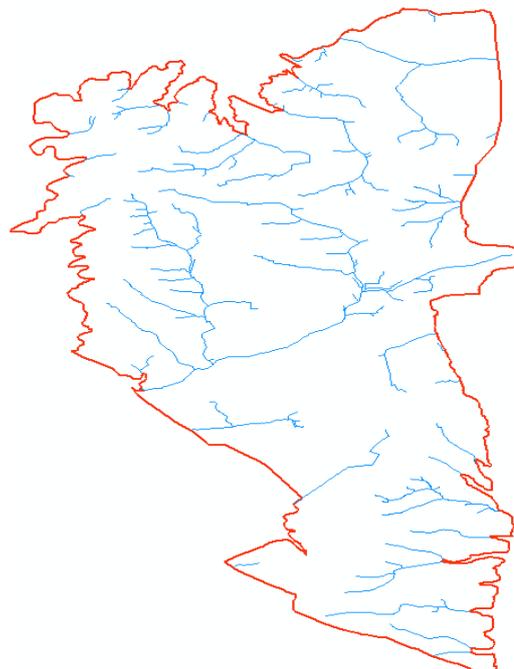
Über einen weiteren unterirdischen Grundwasserabfluss ins tieferliegende Stockwerk entlang von z.B. Störungszonen ist wenig bekannt, ein solcher wird somit im Grundwassermodell nicht berücksichtigt. Im Zuge der Modellkalibrierung wurde die Störungszone bei Seligenstadt mit einem Leakage (0,04 l/s*km²= 1 mm/a) versehen. Hier wird aufgrund der Wasserspiegelmessung der benachbarten Brunnen angenommen, dass der Schichtversatz eine vertikale Wasserwegsamkeit in den oberen Muschelkalk bietet.

Der Leakage-Faktor wird im Grundwassermodell analog zur Grundwasserneubildung über die Elementarflächen der untersten Schicht (ku_1) integriert und dient neben dem Modellabfluss über Oberflächengewässer als weitere Bilanzierungsgröße für die Modellbilanz.

5.5.2.4 Oberflächengewässer

Grundlage für die Implementierung der Oberflächengewässer in das Grundwassermodell ist das Linienshape-File aus Datenbasis 1-13. Da auf einer regionalen Betrachtungsebene der Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer maßgeblich durch die größeren bzw. konstant wasserführenden Gewässer bzw. Gewässerabschnitte erfolgt, wurden zunächst lediglich alle Gewässer bzw. Gewässerabschnitte mit einer Strahler-Ordnung größer gleich 2 umgesetzt und kleinere übriggebliebene Gewässerfortsätze händisch entfernt.

Erste Rechenläufe haben jedoch gezeigt, dass es in Teilbereichen des Modells (z.B. in Talsenken), an denen das Gewässernetz vereinfacht wurde, zu Überschwemmung kommt. Dies zeigt, dass auch kleinere Gewässerabschnitte, welche in der o.g. Vereinfachung nicht berücksichtigt wurden, entscheidend zur Entwässerung beitragen. Somit wurde das Gewässernetz erweitert und lediglich Zuflussabschnitte < 300 m Länge v.a. in den Unsicherheitsbereichen ausgenommen. Das resultierende Gewässernetz ist in Abbildung 7 dargestellt.



— in FEFLOW umgesetztes Gewässernetz

Abbildung 7: Gewässernetz Grundwassermodell

Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser wird im numerischen Modell über eine Fluid-Transfer-Randbedingung und den Austauschkoefizient (In-/Out Transfer Rate) umgesetzt. Die Fluid-Transfer-Randbedingung beschreibt einen potentialgesteuerten Austausch zwischen Gewässer und Grundwasserleiter durch eine limitierende Schicht (z.B. kolmatiertes Flussbett).

Dafür bekannten Knotenpunkten entlang der Gewässer wurden die Gewässerhöhen (Wasserspiegel) zugewiesen und entlang der Gewässerstruktur linear interpoliert, sodass jeder Oberflächengewässer-Gitterpunkt eine Höhe besitzt, welche dem hydraulischen Potential h_{ref} im Gewässer gleichgesetzt wird. Der Wasserfluss Q zwischen Gewässer und Grundwasserleiter erfolgt gemäß

$$Q = A\phi(h_{ref} - h)$$

Q = Wasserfluss in/aus dem Modell

A = Durchflossene Fläche (Seitenfläche des numerischen Elements)

ϕ = Austauschrate

h_{ref} = Referenz Wasserspiegel

h = Druckspiegel im Grundwasser

Die Austauschrate ϕ wird über Mächtigkeit d und Durchlässigkeitsbeiwert k_f der Kolmationsschicht beschrieben

$$\phi = k_f / d$$

Im vorliegenden Fall waren für die meisten Gewässer keine gemessenen Daten zu Wasserspiegelhöhen vorhanden. Es wurden daher Stützpunkte für die Interpolation herangezogen, welche sich aus der Topographie ergeben. Insbesondere in den Bereich starker Hangneigungen z.B. im Gramschatzer Wald war ein vergleichsweise dichtes Netz an Stützpunkten erforderlich, um zu vermeiden, dass bei der linearen Interpolation die Gewässerhöhen über der Geländehöhe lagen, bei gleichzeitiger Wahrung eines monotonen Wasserspiegelgefälles entlang des Gewässers. Trotz der starken Nachverdichtung muss davon ausgegangen werden, dass die Wasserspiegel in Gewässerabschnitten unter- oder überschätzt werden. Da die Differenz zwischen gesetztem Gewässerpotential und Grundwasserspiegel als Berechnungsgrundlage für den Austausch dient, können bereits Abweichungen von wenigen Dezimetern zu erheblichen Unterschieden bei den Austauschströmen führen.

5.5.2.5 Brunnen

Die Grundwasserentnahmen an den Trink- und Brauchwasserbrunnen im Modellgebiet werden über „multi-layer-wells“ abgebildet. Modelltechnisch wird dabei ein fiktives hydraulisch durchlässiges 1-dimensionales Linienelement senkrecht über die durch den Brunnen verfilterten Horizonte gelegt. An dem untersten Knoten des Linienelements wird die Entnahmerandbedingung angesetzt, welche i.d.R. durch die Entnahmerate und damit formell als Neumann-Randbedingung vorgegeben wird. Der Zufluss zum Brunnenfilter (hochdurchlässiges 1D-Linienelement) erfolgt abhängig von der Transmissivität der erschlossenen (numerischen) Schichten. Entsprechend der vorgegebenen Brunnengeometrien (Radius) kann das zuströmende Wasser über das durchlässige Linienelement bis zur Pumpe (repräsentiert durch den Entnahmeknoten am unteren Ende des Filterbereichs) strömen. Der Ansatz der Multilayer-wells ermöglicht die Wasserentnahme über mehrere Modellschichten, ohne den jeweiligen Anteil der Gesamtförderung je Schicht vorab definieren zu müssen.

Im Modell wurden die Trink- und Brauchwasserbrunnen erfasst, welche der Dokumentation zufolge den Unteren Keuper und überlagernde Schichten erschließen.

Grundlage zur Umsetzung der berücksichtigten Brunnen bildet die Zusammenstellung des WWA „Relevante Brunnen“ aus der Datenbasis 3-3 und 3-4. Angaben, welche zur Einspeisung in das GW-Modell benötigt werden (Ausbautiefe, Brunnenradius und Filterstreckenintervall), wurden bei Vorhandensein der Ausbaupläne aus diesen entnommen, ansonsten wurden die benötigten Angaben wie in Tabelle 2 dokumentiert abgeschätzt. Brunnen, für welche die Brunnenangaben nicht ausreichend zu erheben und abschätzbar sind, wurden für die Modellierung ausgeschlossen. Insgesamt können 111 landwirtschaftliche Brauchwasserbrunnen und 13 Trinkwasserbrunnen in der Modellierung berücksichtigt werden – eine Auflistung ist der Anlage 3 und 4 zu entnehmen.

Tabelle 2: Dokumentation der Verarbeitung von Brunnenendaten

Datensatz	Quelle / Kommentar
Koordinaten	Weitestgehend vorliegend. Brunnen ohne angegebenen Koordinaten mit angegebenen Flurstücken wurde über den Umweltatlas mit dem Bohrungsregister abgeglichen und falls eine plausible Bohrung vorhanden ist, dessen Lage übernommen. Ansonsten wurde ein Mittelpunkt auf dem Flurstück gesetzt oder aus vorhandenen Detaillkarten abgeglichen.

Datensatz	Quelle / Kommentar
GOK	Weitestgehend vorliegend. Alternativ wurde die GOK über die Koordinaten aus dem BayernAtlas entnommen.
Ausbautiefe	Weitestgehend aus BIS Datenbank. Falls zu dem Brunnen Ausbaupläne vorliegen, wurde diese aus den Ausbauplänen übernommen. Falls lediglich die Endteufe der Brunnenbohrung vorliegt, wurde diese näherungsweise als Ausbautiefe angesetzt.
Filterstrecke	Falls Ausbaupläne vorhanden, wurden diese übernommen. Dabei bezieht sich die Filterstrecken von Oberkante des obersten Filterabschnitts bis zum Ende der Ausbautiefe. Teilverfilterungen werden aus modelltechnischen Gründen nicht berücksichtigt. Falls keine Ausbaupläne vorhanden sind, wurde die untere Hälfte der Ausbautiefe näherungsweise angesetzt
Ausbau- durchmesser	Falls Ausbaupläne vorhanden, wurden diese übernommen. Ist in den Ausbauplänen lediglich der Bohrdurchmesser angegeben, so wurde der Ausbaudurchmesser mit Faktor 0,4 aus dem Bohrdurchmesser berechnet. Bei Brunnen ohne Angaben, wurde annäherungsweise ein Ausbaudurchmesser von DN125 angesetzt.

Die Entnahmeraten an den einzelnen Brunnen wurden je nach Modellauf (stationär, instationär, Szenarien) unterschiedlich aus der Datengrundlage abgeleitet (siehe Kapitel 5.8).

Viele der Brunnen reichen laut Ausbauplan, bzw. angegebener Bohr- oder Ausbautiefe bis in den Oberen Muschelkalk und damit bis unter das Modellgebiet. Es ist davon auszugehen, dass ein nicht zu quantifizierender Teil des gefördertem Wassers aus dem Oberen Muschelkalk stammt. Im Modell wurde damit so umgegangen, dass auf den Entnahmeknoten der jeweiligen Brunnen ein individueller ‚head-constraint‘ gesetzt wurde. Wird bei der vorgegebenen Entnahmerate der über den constraint definierte Wasserspiegel im Brunnen unterschritten, so wird die Brunnen-Randbedingung in eine Head-Randbedingung, also ein Festpotential umgewandelt. Übertragen bedeutet das, dass bis zur definierten Absenkung Wasser aus dem Modell (Unterer Keuper) entnommen wird, alles weitere Wasser kommt über den head-constraint von außen (Oberer Muschelkalk). Die in den Modellbilanzen ausgegebenen (Zu- und) Abflüsse über die Brunnen können dadurch geringer ausfallen als die tatsächlichen Brunnenförderungen, weil sich in den Bilanzen nur der Teil aus dem Unteren Keuper wiederfindet und der Zustrom aus dem Muschelkalk „gegengerechnet“ wird.

5.5.2.6 Anfangsbedingungen

Die Anfangsbedingungen spielen v.a. für die instationäre Modellierung eine Rolle. Das Grundwassermodell wurde zunächst stationär aufgebaut und kalibriert. Hier wurden als Startwerte in etwa die Grundwasserhöhen aus den vorhandenen Gleichenplänen (Datengrundlage 1-11) für die Knoten aller Modell-Schichten angenommen. In der stationären Modellierung sollten die Ergebnisse unabhängig von den Anfangsbedingungen sein, was hier auch der Fall ist.

Die instationäre Modellierung ist abhängig von den Anfangsbedingungen, da sich das Modell mit jeder Änderung der Randbedingungen auf einen neuen Gleichgewichtszustand zu bewegt. Da dieser Gleichgewichtszustand i.d.R. nur bei konstanten Randbedingungen erreicht werden kann, beeinflusst der Startzustand Bewegungsrichtung und –intensität hin zum neuen Gleichgewicht. Für die (gekoppelte) instationäre Kalibrierung wurden daher die Ergebnisse als Anfangsbedingungen der stationären Kalibrierung herangezogen, wobei die Modellierung zum „Einschwingen“ bereits 2004, also ein Jahr vor dem eigentlichen Betrachtungszeitraum, gestartet wurde. Die letztlichen Anfangsbedingungen für die Sensitivitäts- und Szenarienanalysen waren Ergebnis der Erkenntnisse aus Beobachtungsdaten und der instationären Kalibrierung.

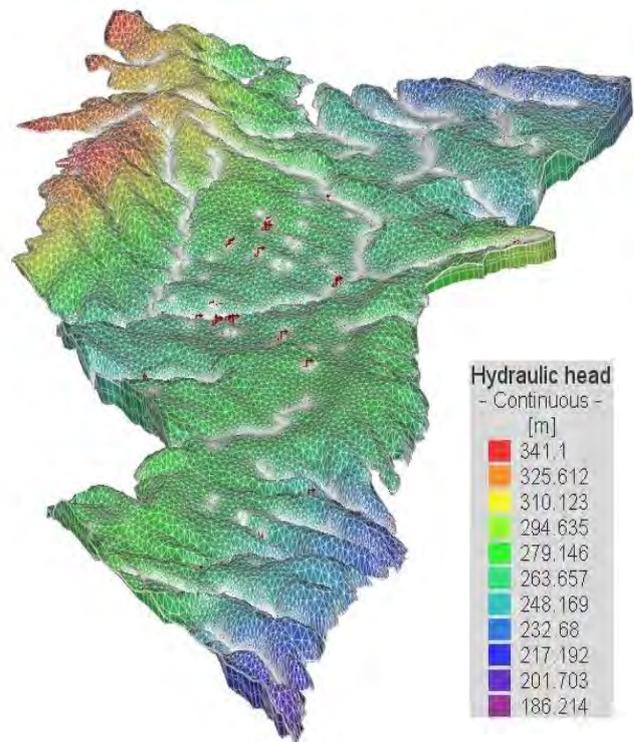


Abbildung 8: Aufbau 3D-Grundwassermodell mit Darstellung der Grundwasserstände

5.6 Umsetzung der hydrogeologischen Modellvorstellung ins numerische Modell

5.6.1 Umsetzung Geologie und Schichtaufbau

Grundlage für das numerische Grundwassermodell ist die geologische Schichtfolge sowie ihre unterschiedlich ausgeprägte Lithologie im Modellgebiet. Der Hauptaquifer in der Bergheimer Mulde, welcher durch die landwirtschaftliche Bewässerung genutzt wird, wird durch die Schichtabfolge aus Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern des Unteren Keupers gebildet. Unterlagert wird der Untere Keuper durch die Schichtfolgen des Muschelkalks, welcher maßgeblich die geologische Muldenstruktur der Bergheimer Mulde prägt. Überlagert wird der Untere Keuper im Modellgebiet stellenweise durch den Mittleren Keuper sowie durch weitreichende z.T. mehrere Meter mächtigen Lößdecken.

Zunächst sollte von Seiten der Grundwassermodellierung geklärt werden, in wie weit der Keuper-Grundwasserkörper in die grobe Untergliederung nach (Freudenberger, et al., 2003) in seine vier Untereinheiten Untere Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1), Werksandstein (kuW), Obere Tonstein-Gelbbankschichten (ku2) und Grenzdolomit (kuD) flächendeckend eingeteilt werden kann, wobei der Grenzdolomit und der Werksandstein die dominierenden, grundwasserführenden Horizonte darstellen. Jedoch können auch innerhalb des ku1 und ku2 geringmächtige, wasserführende Horizonte ausgeprägt sein. Die Schwierigkeit hierbei ergibt sich durch die stark wechselnde, feinschichtige Lithologie aus z.T. sehr geringmächtigen Horizonten sowie der räumlich stark schwankenden lithologischen Ausprägung und Mächtigkeit, besonders relevant für den wichtigen grundwasserführenden Werksandstein. Des Weiteren war zu klären, inwieweit bei einer Untergliederung des Unteren Keupers eine hydraulische Parametrisierung aus der vorhandenen Datenlage erfolgen kann. Die Schwierigkeit hierbei besteht darin, dass der Großteil der Grundwasseraufschlüsse (Brunnen, Grundwassermessstellen) in der Region mischverfiltert ist und daher hydrogeologische Beobachtungen nicht eindeutig einzelnen Lithologien zugeordnet werden können.

Die Erarbeitung und Umsetzung der geologischen Verhältnisse im Modellgebiet erfolgte auf Grundlage der geologischen Karten mit Erläuterungen (Datenbasis 1-6, 1-10, 3-8, 3-9), Bohrungen im Modellgebiet (2-1, 3-7), Vorkenntnisse aus der geologischen 3D-Modellierung des Maindreiecks (1-8) sowie die durch den Regionalgeologen erarbeiteten geologischen Schnitte und validierten Bohrprofile (3-8).

5.6.2 Umsetzung der geologischen Verhältnisse und Tektonik

Die Umsetzung der geologischen Verhältnisse in das GW-Modell erfolgt ausgehend von der eindeutig zu identifizierenden und strukturprägenden Schichtgrenze des Oberen Muschelkalks zum Unteren Keuper mit den in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Ergänzungen und Änderungen.

Die Störungszonen im Modellgebiet sind durch die Streichlinienkarte des Oberen Muschelkalks bereits räumlich und mit ihren entsprechenden Versatzbeträgen repräsentiert und sind analog im GW-Modell umgesetzt. Dabei erfolgt die Umsetzung der Störungsversätze im Grundwassermodell nicht als sprunghafter Versatz, sondern als versetzte, aber durchgängige Schichten. Hierzu sind in der Streichlinienkarte in Bereichen mit starken Versätzen Hilfspunkte zur Interpolation gesetzt. Die hydraulische Funktion an Störungszonen ergibt sich hierbei aus der resultierenden Schichtlagerung sowie den hydraulischen Eigenschaften der betroffenen Schichtpakete.

Aus den in 5.4 beschriebenen Gründen wurde der Unsicherheitsbereich Nord weiterhin in dem Modellraum integriert. Auch hier ergibt sich die hydraulische Funktion der Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszone aus der auf Grundlage der Streichlinienkarte interpolierten Geometrie. Im Zuge der Modellkalibrierung wurden die dominierenden Verwerfungen der Gähnheim-Eßleben-Schwanfelder Störungszone quer zum Störungsverlauf als hydraulisch gering durchlässig umgesetzt, indem die Durchlässigkeit des Unteren Keupers lokal verringert wurde.

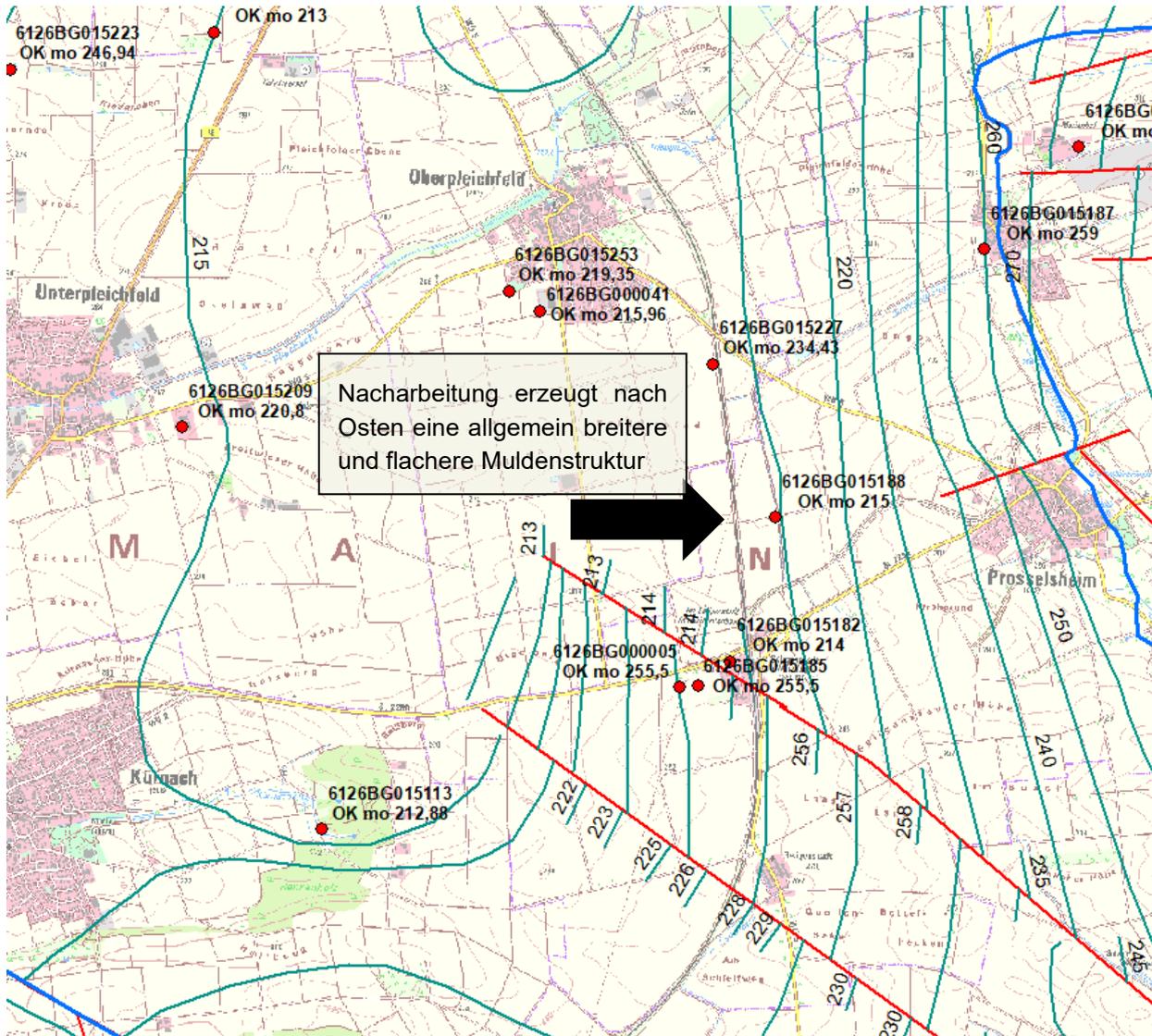


Abbildung 9: Ausschnitt der Streichlinienkarte OK Oberer Muschelkalk mit Anpassungen durch R&H Umwelt inklusive Hilfslinien zur Interpolationshilfe zur besseren Darstellung des Störungsversatzes.

5.6.3 Schichtgrenzen und vertikale Untergliederung

Bei der Umsetzung der vertikalen stratigraphischen Untergliederung in entsprechende numerische Modellschichten wurde der Ansatz gewählt, zunächst den Unteren Keuper anhand vorliegender und durch den Regionalgeologen [redacted] verifizierten Bohrprofilen zu unterteilen. Somit können auch modelltechnisch unterschiedliche Grundwasserleiter im kuD und kuW, wie sie sich in den Wasserspiegelbeobachtungen darstellen, abgebildet werden. Trotz teils dünner Datenlage in Bezug auf eine Parametrisierung der einzelnen Einheiten des Unteren Keupers (z.B. kf-Werte aus Pumpversuchen) wurden die 4 Haupteinheiten (ku1, kuW, ku2, kuD) als getrennte Schichten umgesetzt. Nur so wurde die Abbildung der teilweise stark gespannten Verhältnisse v.a. im Werksandstein und die in Teilbereich deutlichen Unterschiede in den Wasserspiegeln zwischen kuD und kuW überhaupt erst möglich.

Die Untergliederung des Unteren Keupers sowie die Umsetzung der geologischen Einheiten in das Grundwassermodell konnte wie in Tabelle 3 zusammengefasst umgesetzt werden. Die Erarbeitung ist nachfol-

gend dokumentiert. Unabhängig von geologischen Verhältnissen wurden die Schicht der Grundwasserüberdeckung (Quartär äolisch und mittlerer Keuper) in 2 numerische Schichten unterteilt. Die Unterteilung verläuft in etwa auf Höhe des Wasserspiegels. Damit wird quasi eine Trennung in ungesättigte und gesättigte Zone erreicht, was der numerischen Stabilität zuträglich ist. Der ku2 wurde in 3 numerische Schichten unterteilt. Grund hierfür ist eine verbesserte Abbildung des vertikal variablen hydraulischen Potentials in den beiden angrenzenden Grundwasserleitern (kuW und kuD).

Tabelle 3: Umsetzung der geologischen Einheiten im Grundwassermodell

Layer	Geologische Einheit		Ausprägung	Mittlere Mächtigkeit
1	Quartär (fluviatil) + Boden		Grundwasserleiter	1 m, im Bereich der quartären Rinnen bis zu 3,5 m
2+3	Quartär (äolisch)		Grundwassergeringleiter	Nicht differenziert, berechnet aus Restmächtigkeit OK ku und GOK
	Mittlerer Keuper		Grundwassergeringleiter	
4	Unterer Keuper	Grenzdolomit (kuD)	Grundwasserleiter	2,12 m
5-7		Obere Tonstein-Gelbkalkschichten (ku2)	Grundwassergeringleiter	23,34 m
8		Werksandstein (kuW)	Grundwasserleiter	5,62 m
9		Untere Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1)	Grundwassergeringleiter	15,78 m

Unterer Keuper

Die Modellbasis bildet die Streichlinienkarte der Schichtgrenze mo/ku (Datenbasis 1-7), in welcher die Muldenstruktur der Bergtheimer Mulde sowie die bekannten Störungszonen mit ihren Versätzbeträgen repräsentiert sind. Für die vertikale Untergliederung des Unteren Keupers wurde die Schichtmächtigkeit des ku1, kuW, ku2 und kuD aus den durch den Regionalgeologen verifizierten und als aussagekräftig eingestuft Schichtgrenzen erarbeitet und pro Untereinheit eine mittlere Mächtigkeit errechnet (siehe Tabelle 1).

Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Gesamtmächtigkeit des Unteren Keupers mit Schwankungen um lediglich ca. 3 m im Untersuchungsgebiet als relativ gering zu betrachten, wodurch der Untere Keuper im Modell unter der Annahme einer konstanten Mächtigkeit umgesetzt werden kann. Eine Umsetzung der Schichtmächtigkeiten der Untergliederungen mit der vorgefunden Schwankungsbreiten wird auf Grund der geringen Anzahl an verifizierten Schichtgrenzen pro Untereinheit sowie zu geringer Anzahl an potenziellen Interpolationpunkten als große Unsicherheitsquelle und somit für ein regionales Grundwassermodell als nicht zielführend eingestuft. Ein Ansatz als idealisiertes geologisches Schichtenmodell mit weitgehend konstanten Mächtigkeiten stellt zwar einen vereinfachten Ansatz dar, bietet jedoch eine höhere Kontrolle über das hydraulische Geschehen sowie eine erhöhte numerische Stabilität im Modellgebiet. Anhand der durch Bohrungen belegten Schichtgrenzen, der Verbreitungsgrenzen/Ausstriche der einzelnen Einheiten nach geologischer Karte, den Streichlinien der Unterkante des Unteren Keuper und den mittleren Schichtmächtig-

keiten wurden für alle im Modell repräsentierten Einheiten Streichlinien erstellt. Diese wurde als Interpolationsbasis für die Modellschichten herangezogen. Es ist anzumerken, dass insbesondere in den Bereich der Störungszonen teils widersprüchliche Bohrprofile vorliegen. Auffällig waren hier v.a. Bereiche zwischen Opferbaum, Hausen und Eßleben, sowie rund um Seligenstadt. Hier wurden die vom Regionalgeologen als plausibel eingestuft Bohrprofile stärker berücksichtigt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass unplausibel erscheinende, unberücksichtigt gebliebene Bohrprofile tatsächlich entsprechende Versätze im Untergrund abbilden.

Mittlerer Keuper und äolisches Quartär (Lössdecken)

Da der Mittlere Keuper nicht flächendeckend im Modellgebiet verbreitet und nicht als relevanter Grundwasserleiter zu betrachten ist, ist eine detaillierte vertikale Untergliederung für die zugrunde liegende Fragestellung von geringerer Bedeutung. Weiter wird auf Grund der fehlenden Möglichkeit den sich ggf. ausbildenden Interflow zu verifizieren bzw. Schichtwasseraustritte zu kalibrieren eine Untergliederung der Deckschichten als nicht zielführend erachtet.

Da sich die Mächtigkeit des Unteren Keupers wie in Tabelle 1 dargestellt als annähernd konstant annehmen lässt, kann die Schichtmächtigkeit, der auf dem Unteren Keuper aufliegenden Deckschichten durch die vorhandene Restmächtigkeit zwischen Oberkante des Unteren Keupers und Geländeoberkante berechnet werden. Dabei umfasst die Restmächtigkeit den Mittleren Keuper sowie die aufliegenden Lössdecken (äolisches Quartär). Da für die Modellierung der Grundwasserströmung sowie der Grundwasserentnahmen der Mittlere Keuper und die Lössdecken eine untergeordnete Rolle spielen, sind die damit entstehenden Ungenauigkeiten in der Schichtmächtigkeit in dem vorliegenden regionalen Modell vertretbar. Weiter können die ggf. unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften und somit die Sickerstrecke der Grundwasserneubildung innerhalb der Deckschicht durch einen mittleren (vertikalen) kf-Wert modelltechnisch gut abgebildet und entsprechend angepasst werden.

Fluviales Quartär

Die Verbreitung des fluvialen Quartärs wurde aus der geologischen Karte digitalisiert und in die oberste Modellschicht integriert. Eine genaue Ausarbeitung der Mächtigkeiten der quartären Rinnen (Flusstäler) ist durch mangelnde Aufschlussverhältnisse nicht sinnvoll. Die Quartärmächtigkeiten wurden daher an den Taleinschnitten in Abhängigkeit von der Topographie mit bis zu 3,5 m abgeschätzt. Das fluviale Quartär ist im Grundwassermodell die Schnittstelle zur Anbindung der Oberflächengewässer an sein jeweiliges quartäres Flussbett, welche numerisch über einen Austauschkoefizient gesteuert wird.

Ein Vergleich der erstellten Profile des Regionalgeologen [REDACTED] und dem entsprechenden Schnitt durch den Schichtenaufbau des numerischen Grundwassermodells ist in Anlage 4 grafisch dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die in Profil A dargestellte Abschiebung im Bereich der Riedener Senke im Profil des Regionalgeologen auf der Extrapolation einer in ca. 1200 m entfernten Bohrung beruht und im Grunde nicht auf der eigentlichen Profillinie liegt. Somit ist die Riedener Senke nicht im Schnitt durch das Grundwassermodell dargestellt.

5.6.4 Erfassung der Verbreitung der geologischen Einheiten

Die räumliche Verbreitung der Untereinheiten des Unteren Keupers wurde wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben umgesetzt. Zu beachten und für die Umsetzung der Geologie im Grundwassermodell relevant sind die zwei inselförmigen Ausbisse des Oberen Muschelkalks im westlichen Teil des Modellgebiets bei Rupprechts- hausen sowie südlich von Erbshausen.

Da das numerische Grundwassermodell aus durchgehenden Schichten aufgebaut ist, ergeben sich Bereiche, in denen die geologische Schicht ausstreicht, die numerische Schicht aber weiter vorhanden ist („Reliktschichten“). In diesen Bereichen schrumpft die Mächtigkeit der numerischen „Reliktschichten“ auf ein Minimum (0,1 m). In der Parametrisierung werden den „Reliktschichten“ die Eigenschaften unterlagernder, real noch vorhandener geologischer Schichten zugewiesen.

5.7 Parametrisierung

5.7.1 Geohydraulische Kennwerte

Eine große Unsicherheit, jedoch für das hydraulische Geschehen im Modellgebiet maßgeblich mitbestimmend, ist die Zuweisung der geohydraulischen Kennwerte zu den Untereinheiten des Unteren Keuper. Da Pumpversuche größtenteils aus mischverfilterten Brauch- und Trinkwasserbrunnen vorliegen, ist die Bestimmung der k_f -Werte einzelner Horizonte nicht bzw. nur mit Unsicherheit bestimmbar. Vorliegende bereits ausgewertete Pumpversuche sind in der Datenbasis 3-1 zusammengestellt und dienen als Orientierung. Die hier ermittelten k_f -Werte (horizontale Durchlässigkeit) für den Unteren Keuper liegen zwischen $2,3 \cdot 10^{-3}$ und $5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s, wobei davon auszugehen ist, dass die bepumpten Brunnen in den ergiebigeren Bereichen des Unteren Keupers (kuD, kuW) ausgebaut sind und somit die geringer leitenden Horizonte (ku1, ku2) unterrepräsentiert sind.

Weiter ist die Anisotropie der Sedimentgesteine und die daraus resultierende unterschiedliche hydraulische Durchlässigkeit in horizontale und vertikale Richtung zu beachten, wobei die vertikale hydraulische Durchlässigkeit bei geschichteten Sedimentgesteinen typischerweise geringer ist und maßgeblich zur Ausprägung der gespannten Verhältnisse beiträgt.

Tabelle 4: Hydraulische Kennwerte

Layer	Geologische Einheit		Ausprägung	k_f (horizontal) [m/s]	k_f (vertikal) [m/s]
1	Quartär (fluviatil)		Grundwasserleiter	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
	Deckschichten außerhalb der Täler			$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
2+3	Quartär (äolisch)		Grundwasser- geringleiter	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$
	Mittlerer Keuper				
4	Unterer Keuper	Grenzdolomit (kuD)	Grundwasserleiter	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$
5-7		Obere Tonstein- Gelbkalkschichten (ku2)	Grundwasser- geringleiter	$5 \cdot 10^{-6}$ ($3 \cdot 10^{-6}$)	$1 \cdot 10^{-9}$ ($7 \cdot 10^{-10}$)
8		Werksandstein (kuW)	Grundwasserleiter	$4 \cdot 10^{-5}$ ($2 \cdot 10^{-5}$)	$1 \cdot 10^{-6}$ ($5 \cdot 10^{-7}$)
9		Untere Tonstein- Gelbkalkschichten (ku1)	Grundwasser- geringleiter	$3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$)	$1 \cdot 10^{-9}$

Die Parametrisierung der im Modell umgesetzten Schichten erfolgt räumlich anhand der unter 5.6.4 beschriebenen Verbreitung. Da in FEFLOW Schichten nur als durchgängige Schichten dargestellt werden

können, bleiben ausgestrichene geologische Schichten im Modell mit geringer Restmächtigkeit weiter erhalten, sind aber wie die darunter liegende (noch anstehende Schicht) parametrisiert.

Tabelle 4 bietet einen Überblick über die implementierten geohydraulischen Kennwerte des instationär kalibrierten Modells. Gegenüber den Ausgangswerten des ersten Ansatzes wurden im Rahmen der Kalibrierung die Leitfähigkeitskontraste verstärkt, um die unterschiedlichen Wasserspiegel in kuD und kuW, sowie die gespannten Verhältnisse abbilden zu können. Die Randbereiche der Bergtheimer Mulde sind bis in den Unteren Keuper hinein teilweise nicht wassererfüllt. Die verringerten ungesättigten Leitfähigkeiten sind in Tabelle 4 in Klammern angegeben. In den zentralen und südlichen Talbereichen der Pleichach weisen die Wasserspiegelbeobachtungen (u.A. GWM 4) darauf hin, dass hier kuD und kuW hydraulisch kaum voneinander getrennt sind. Inwieweit hier durch eine hohe Bohrungsdichte hydraulische Verbindungen zwischen den GW-Leitern geschaffen wurden oder die Trennung natürlicherweise besteht, ist nicht nachvollziehbar. Im Modell wurden die Trennschichten (ku2) in diesen Bereichen lokal durchlässiger gestaltet.

Eine zonale Unterteilung der hydrogeologischen Einheiten mit unterschiedlichen kf-Werten im Zuge der Kalibrierung wurde nicht umgesetzt. Aufgrund der geringen Anzahl von Pumpversuchen mögen horizontale kf-Zonierungen zwar zu optimierten Kalibrierungsergebnissen führen, erhöhen aber gleichzeitig massiv die Anzahl der Freiheitsgrade und der Uneindeutigkeit der Modellierung (bei vielen Parameter und wenigen Messwerten können unterschiedliche Kombinationen von Parametern zu gleich guten Ergebnissen führen, sind dann aber u.U. nicht auf andere Randbedingungen übertragbar). Weitere Erläuterungen finden sich unter 5.9 Modellkalibrierung.

5.7.2 Austausch Grundwasser Oberflächengewässer

Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser wird im numerischen Modell über eine Fluid-Transfer-Randbedingung und den Austauschkoeffizient (In-/Out Transfer Rate) umgesetzt. Die Fluid-Transfer-Randbedingung beschreibt einen potentialgesteuerten Austausch zwischen Gewässer und Grundwasserleiter durch eine limitierende Schicht (z.B. kolmatiertes Flussbett).

Da sowohl der Durchlässigkeitsbeiwert sowie die Mächtigkeit der Kolmationsschicht für die im Modellgebiet betrachteten Gewässer nicht bekannt sind, werden diese anhand der Gewässerstrukturkartierung 2017 (Datenbasis 1-18) abgeschätzt. Der kartierte Parameter W_EP45 teilt den Grad der Kolmation der kartierten Gewässer in 5 Kategorien 0 / 1 / 4 / 7 / 99 von wenig bis stark kolmatiert bzw. nicht erhoben (99) ein (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018). Darauf basierend wurden kf-Werte der Kolmationsschicht abgeschätzt und vergeben.

Tabelle 5: Abschätzung der In/Out-Transfer Rate anhand der Gewässerstrukturkartierung

	Kolmationskategorie W_EP45	k_f [m/s]	out-T-Rate [d] Für d = 0.2 m	In-T-Rate [d] Für d = 0.2 m
wenig kolmatiert	0	1.00E-04	43,20	8,64
	1	1.00E-05	4,32	0,86
	4	1.00E-06	0,43	0,09
stark kolmatiert	7	1.00E-07	0,04	0,01
k.a.	99	1.00E-06	0,43	0,09
nicht in GSK kartiert		1.00E-06	0,43	0,09

Die Mächtigkeit d der Kolmationsschicht wurde mit 0,2 m abgeschätzt. Da durch den Sedimentationsprozess bedingt die Anbindung des Gewässers an den Grundwasserleiter aus Richtung des Grundwasserleiters in das Gewässer als höher anzunehmen ist als andersrum, wurde die Out-Transfer-Rate (aus dem Modell ins Gewässer) um Faktor 5 höher eingestuft als die In-Transfer-Rate. Für Gewässer, welche nicht im Zuge der Gewässerstrukturkartierung aufgenommen wurden, wird ein mittlerer kf-Wert angenommen. Somit ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Werte. Da die o.g. Parametrisierung lediglich abgeschätzt werden kann, dient diese zunächst als Startwert und wurde im Zuge der Kalibrierung und unter Betrachtung des Wasserbudgets aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell angepasst. So wurde z.B. der im gekoppelten Modell berechnete Gewässerabfluss (Zu-/Abfluss aus Grundwassermodell + Oberflächenabfluss) auf Plausibilität geprüft und in Teilbereichen wurde der Leakage-Koeffizient korrigiert.

In die Berechnung der Austauschströme fließt die Austauschfläche, also der wasserbenetzte Umfang der Gewässersohle ein. Da die Gewässer in FEFLOW nicht 3-dimensional abgebildet sind, erfolgt der Austausch über eine fiktive senkrechte Fläche, die zwischen den Gewässerknoten der ersten und zweiten Modellschicht aufgespannt wird. Diese Geometrieabweichung zwischen Modell und Realität fließt bei der Kalibrierung implizit in den Transferkoeffizienten als „Korrekturfaktor“ ein, wodurch der Leakage-Koeffizient im Modell von den nach Tabelle 5 abgeleiteten Werten abweicht. Die Spannbreite der Leakage-Faktoren liegt aber weiterhin im Bereich der tabellarisch aufgeführten Werte (vgl. Abbildung 10).

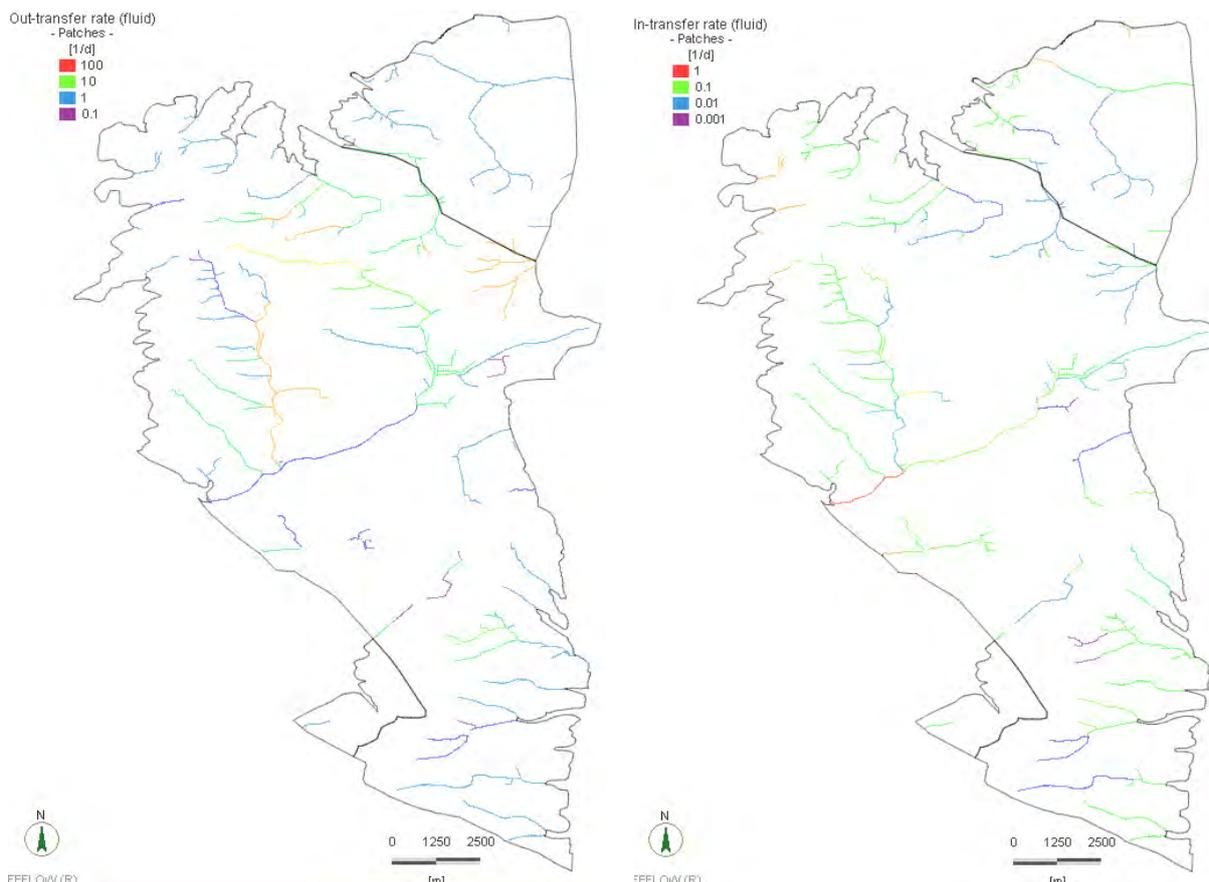


Abbildung 10: Verteilung Leakage-Faktoren der Oberflächengewässer, links: Out-Transfer, rechts: In-Transfer

5.8 Einbindung der Grundwasserentnahmen durch Trink- und Brauchwasserbrunnen

Die Grundwasserentnahmen aus den einzelnen Brunnen sind in unterschiedlichem Umfang dokumentiert. Vor Einbindung ins Modell wurden die vorhandenen Daten aufbereitet. Mit bestehenden Datenlücken wurde wie nachfolgend erläutert umgegangen.

5.8.1 Entnahmen aus Trinkwasserbrunnen

Grundlage zu den Entnahmemengen der Trinkwasserversorger liefert die Datenbasis 3-3 Entnahmemengen Trinkwasserversorger. Für das stationäre GW-Modell wurden die Zeitreihen von 2012 bis 2019 berücksichtigt und zunächst für das stationäre Modell durchschnittliche Entnahmeraten erarbeitet. Hierfür wurden zur Darstellung der Entnahmedynamik monatliche sowie durchschnittliche Jahresentnahme gebildet. Die Erarbeitung der Brunnendaten zur Implementierung in das Grundwassermodell erfolgte anhand der jeweiligen Ausbaupläne. Die umgesetzten Trinkwasserbrunnen sind in Anlage 3 aufgeführt.

Für das instationäre Modell wurden die monatlichen Entnahmedaten angesetzt und linear auf Tageswerte interpoliert. Die resultierenden Entnahmen der Brunnen im Modellgebiet, zusammengefasst nach Wasserversorger, sind in Abbildung 11 dargestellt.

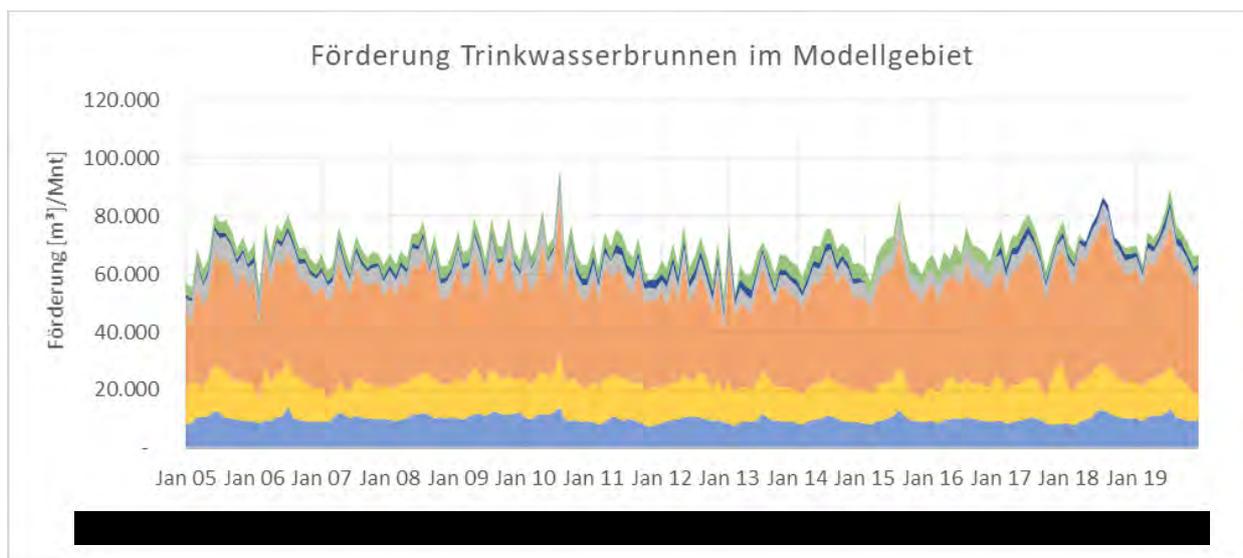


Abbildung 11: Grundwasserförderung Wasserversorger im Modellgebiet

5.8.2 Entnahmen aus Brauchwasserbrunnen

Grundlage zur Erarbeitung der Grundwasserentnahmemengen der landwirtschaftlichen Brauchwasserbrunnen für das Landschaftswasserhaushaltsmodell bilden primär die monatlich aufgezeichneten Entnahmemengen aus der Datenbasis 3-3 und 3-4 sowie die jährlichen Entnahmedaten aus der TGA-Datenbank.

Als Betrachtungszeitraum zur Erarbeitung durchschnittlicher Entnahmewerte für das stationäre Modell wurden die Jahre 2015 bis 2017 gewählt, da hierfür die beste Datengrundlage besteht. Zur Ermittlung der durchschnittlichen Entnahmemengen für diesen Zeitraum wurden zunächst, wo vorhanden, aus den monatlichen Entnahmemengen zur Begutachtung der Bewässerungsdynamik langjährige Monats- und Jahresdurchschnitte gebildet und daraus eine Durchschnittsentnahme für den Betrachtungszeitraum berechnet. Sind die Entnahmemengen nur für mehrere Brunnen gemeinsam aufgezeichnet, so wurde die Entnah-

mehrmenge zu gleichen Anteilen auf die Brunnen verteilt. Da lediglich die größeren Landwirte ihre tatsächlichen Entnahmemengen monatlich aufzeichnen, wurde für Brunnen kleinerer Landwirte die Jahresentnahme aus der TGA-Datenbank ergänzt. Für die nachträglich in die Betrachtung aufgenommenen Brunnen von [REDACTED] im Unsicherheitsbereich Nord wurde die pro Brunnen anteilige genehmigte Jahresentnahmemenge angesetzt, sodass für das stationäre Grundwassermodell für jeden Brunnen eine durchschnittliche Grundwasserentnahme implementiert werden kann. Doppelt geführte Brauchwasserbrunnen, welche sowohl unter dem Namen des jeweiligen Landwirtes als auch unter dem Berechnungsverbandes Unterpleichfeld geführt wurden, werden im weiteren Verlauf dem jeweiligen Landwirt zugeschrieben. Somit werden total 111 landwirtschaftliche Brauchwasserbrunnen berücksichtigt. Eine Auführung dieser Brunnen ist der Anlage 4 zu entnehmen.

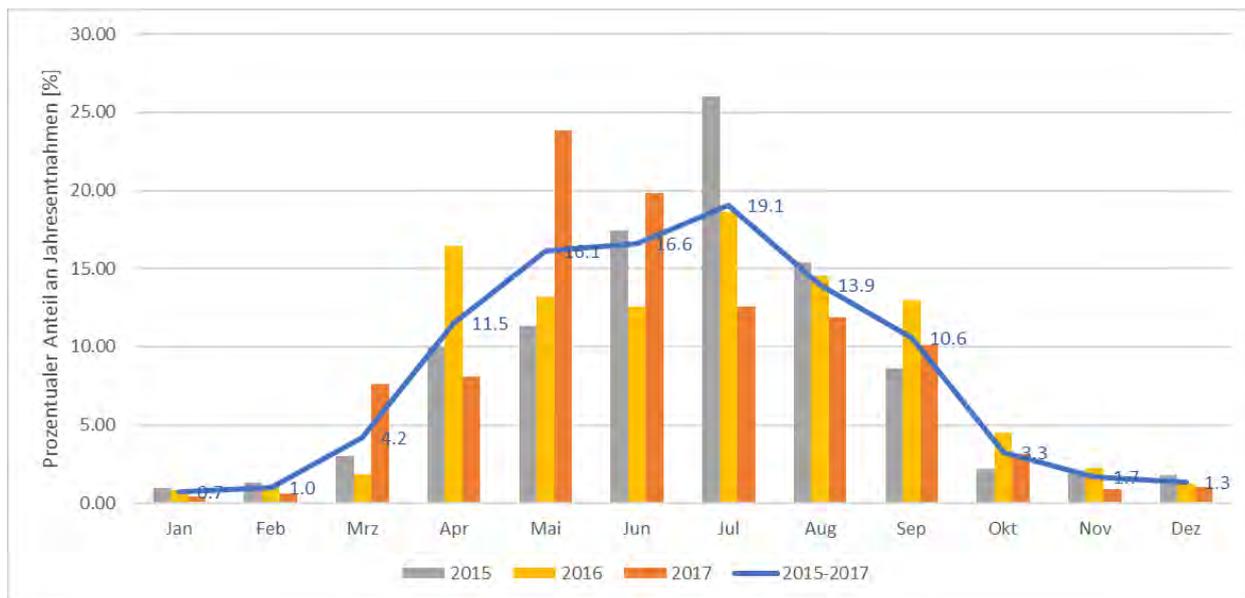


Abbildung 12: Prozentualer monatlicher Anteil an der jeweiligen Jahresentnahme berechnet aus allen Brauchwasserbrunnen für die Jahre 2015, 2016 und 2017 für die instationäre Kalibrierung.

Zur besseren Handhabung und Zuordnung im gekoppelten Modell wurde allen Brunnen mit einem gemeinsamen Wasserrecht einer Brunnengruppe zugeschrieben, woraus sich insgesamt 34 Brunnengruppen ergeben.

Mit Hinblick auf die Weiterentwicklung vom stationären zum zeitabhängigen instationären Grundwassermodell wurde die Dynamik der Grundwasserentnahmen der berücksichtigten Brunnen je nach vorliegender Datenbasis (monatliche bzw. jährliche Entnahmemengen) im Modell implementiert. Für alle Brunnen, für welche monatliche Entnahmen übermittelt werden, wurden diese im Grundwassermodell unverändert für die entsprechenden Brunnen hinterlegt. Für alle weiteren Brunnen mit lediglich jährlicher Erfassung der Entnahmemenge wurde diese anhand einer zweigliedrigen monatlichen Verteilungsfunktion (siehe Abbildung 13) aufgeteilt und anschließend analog zu der täglichen Auflösung des Modells linear auf Tagesentnahmen umgerechnet. Die Verteilungsfunktion gliedert sich aufgrund der unterschiedlich repräsentativen Datengrundlage in zwei Zeiträume. Für die frühen Jahre von 2004 - 2010 wurde aufgrund der dünnen Datenlage eine wiederkehrende, durchschnittliche monatliche Verteilung aus diesem Zeitraum berechnet und angesetzt. Für den Zeitraum 2010 – 2019 wurde die Verteilungsfunktion anhand der tatsächlichen Entnahmedynamik eines jeden Jahres ermittelt und umgesetzt.

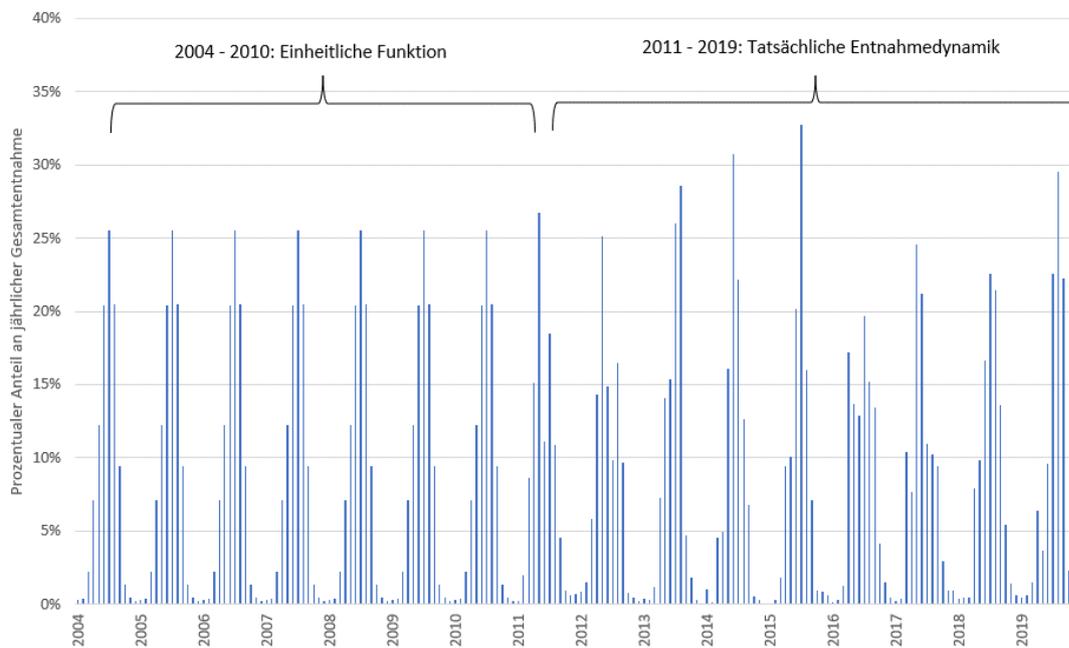


Abbildung 13: Zweigliedrige Verteilungsfunktion zur Generierung von monatlichen Entnahmemengen aus den jährlich übermittelten Grundwasserentnahmen für das Grundwassermodell.

Wie Abbildung 14 zeigt, wurde gemäß den monatlichen Aufzeichnungen der Brunnenentnahmen der Landwirte auch in den Wintermonaten zwischen November bis März geringere Mengen Grundwasser entnommen. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass die Winterentnahmen zwar dem Grundwasserhaushalt und damit dem Grundwassermodell entnommen werden, aber nicht für die Beregnung, sondern als Brauchwasser genutzt werden.

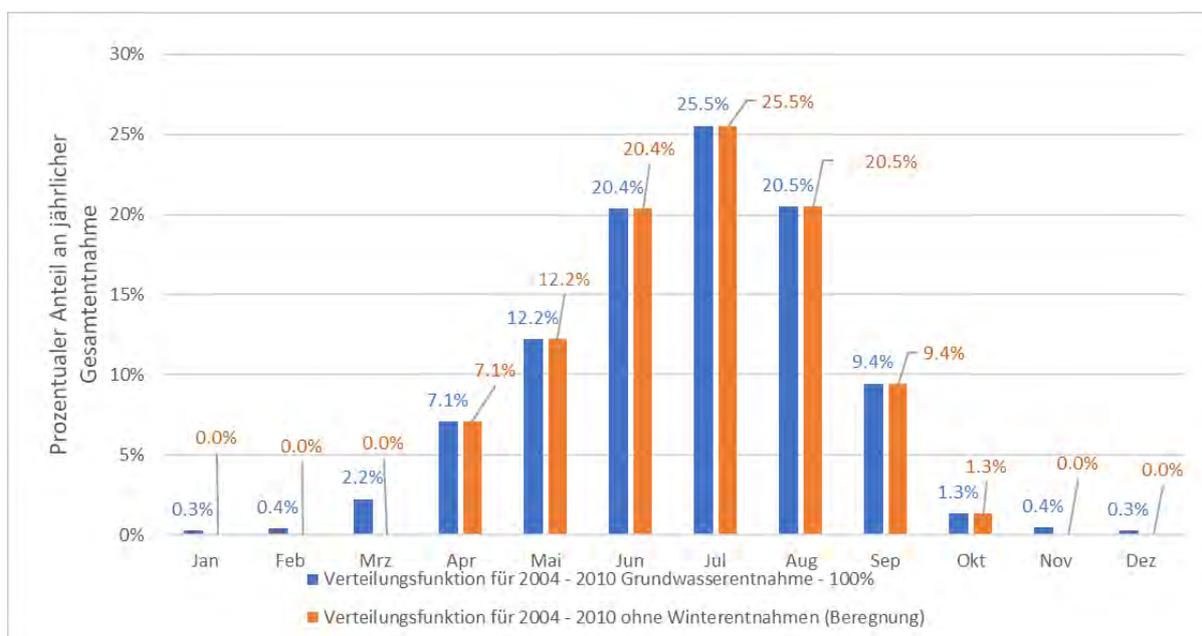


Abbildung 14: Verteilungsfunktion der frühen Jahre 2004 – 2010 für das instationäre Grundwassermodell mit und ohne Winterentnahmen.

Entsprechend wurde wie in Abbildung 14 dargestellt im Grundwassermodell die tatsächlichen monatlichen Entnahmemengen inklusive der geringfügigen Winterentnahmen umgesetzt. Im Bodenwasserhaushaltsmodell wurden die Grundwasserentnahmen in den Wintermonaten November – März hingegen nicht dem Wasserhaushalt über die Bewässerung zurückgeführt. Die hierbei entstehende Budgetdifferenz von ca. 4% wird als plausibel und realistisch eingestuft. Die erarbeiteten monatlichen Grundwasserentnahmen werden als Summe pro Brunnengruppe an das BWHM übergeben.

Zusammen ergeben sich die in Abbildung 15 dargestellten monatlichen Förderungen der Brauchwassergruppen, hier dargestellte aufgegliedert nach Brunnengruppen. Klar zu erkennen sind die Förderspitzen in der Vegetationsperiode sowie der trockene Sommer 2015 mit erhöhter Förderung. Neben vielen kleinen und mittleren Entnahmen werden durch die [redacted] die [redacted] [redacted] und [redacted] die größten Entnahmen getätigt.

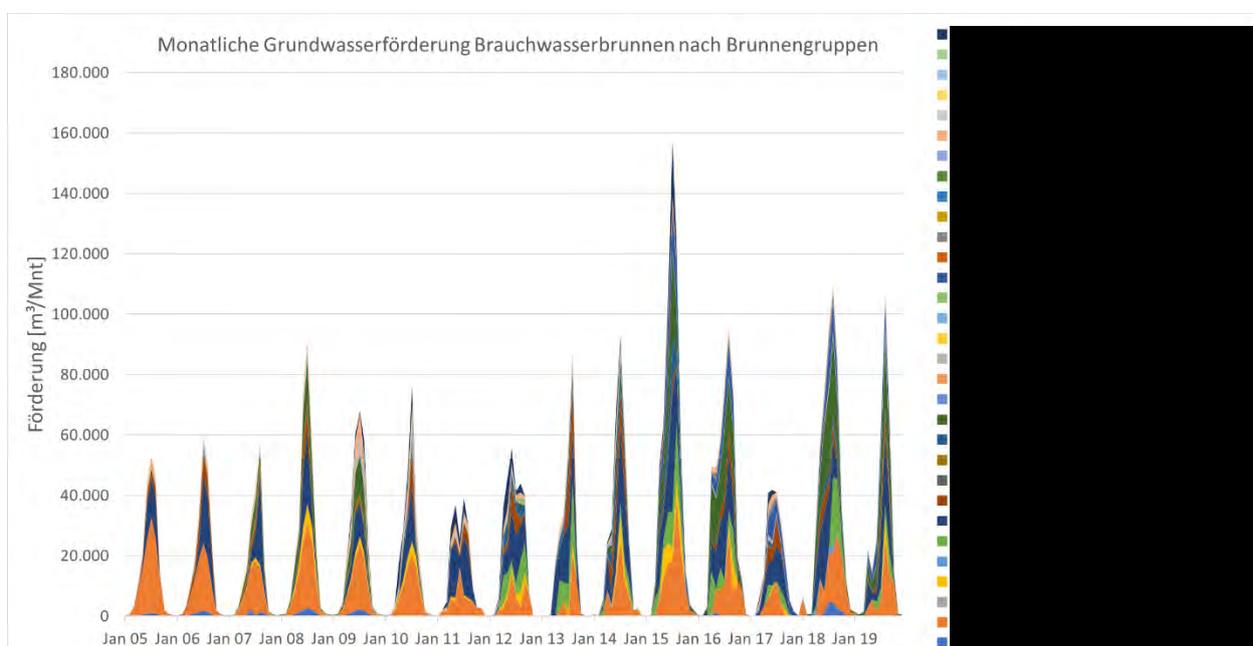


Abbildung 15: Grundwasserförderung Brauchwasserbrunnen im Modellgebiet nach Brunnengruppen

5.8.3 Variation der Entnahmen

Für die Sensitivitäts- und Szenarienrechnungen (Kapitel 8.2) wurden die ermittelten realen Entnahmen je nach Szenario mit einem Faktor (+/-10-30% belegt). An einzelnen Brunnen kam es dadurch zu besonders entnahmereichen Zeiten (z.B. Sommer 2015) zu numerischen Schwierigkeiten. Dies betraf v.a. die Brunnen [redacted] 3, 5, 11, 15 und 16. Hier wurden die Spitzen etwas gekappt und auf den Vor- und Folgemonat umverteilt.

Die wasserrechtlichen Genehmigungen zur Entnahme bezieht die maximal genehmigte Jahresentnahme häufig auf mehrere Brunnen (=Brunnengruppe). Den Brunnenbetreiber steht es dann mehr oder weniger frei das Kontingent je nach Bedarf und Ergiebigkeit der Brunnen auf die zugeordneten Brunnen zu verteilen. Beim Szenario „B2 genehmigte Entnahmen“ wurden die Wasserrechte, welche mehreren Brunnen zugeordnet sind, zunächst gleichmäßig auf alle Brunnen verteilt. Werden unterschiedlich ergiebige Brunnen unter einem Wasserrecht zusammengefasst, kommt es an den weniger ergiebigen Brunnen bei einer Gleichverteilung der Entnahmen zu Schwierigkeiten. An Brunnen, an denen sich im Modell numerische

Schwierigkeiten aufgrund zu hoher Entnahmen zeigten, wurden die Entnahmen auf andere Brunnen der gleichen Brunnengruppe umverteilt.

Die Jahresentnahmemenge wurde mittels eines Verteilungsschlüssels, der sich aus der durchschnittlichen realen innerjährlichen Verteilung der Entnahmemengen ergibt auf die einzelnen Monate aufgeteilt.

5.9 Modellkalibrierung

Die Beobachtungen an den Doppelmessstellen und den durch Druckmesssonden überwachten Brunnen, sowie die bei „gleichem“ Ausbau teils unterschiedlichen realisierbaren Förderraten an einzelnen Brunnen legen nahe, dass die hydraulischen Durchlässigkeiten in den einzelnen geologischen Einheiten deutlich schwanken. Allein durch ungenau abgebildete Schichtmächtigkeiten (Auswirkung auf Transmissivitäten) lassen sich die Beobachtungen nicht erklären.

5.9.1 Stationäre Kalibrierung

Das Grundwassermodell wurde zunächst mit einer mittleren Grundwasserneubildung von 60 mm/a anhand der Grundwasserspiegeldaten der Stichtagsmessung (Datengrundlage 2-6) stationär ungekoppelt kalibriert.

Die Übereinstimmung der gemessenen mit den gerechneten Grundwasserständen wurde nach Grundwasserleitern getrennt ausgewertet.

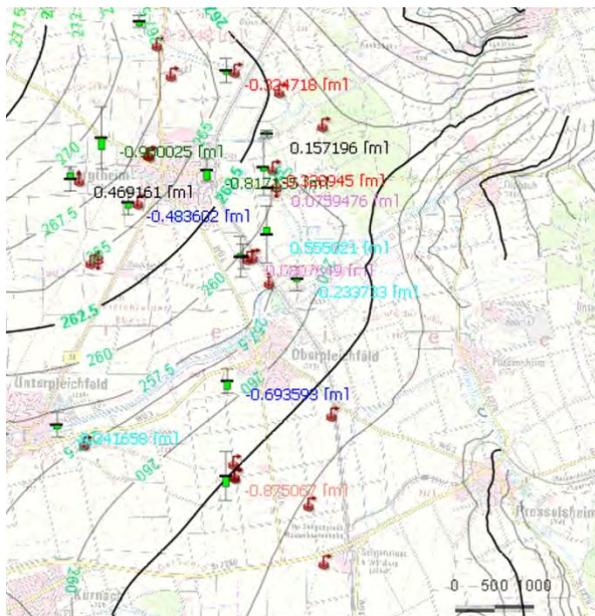


Abbildung 16: stationäre Kalibrierung, Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten, Grenzdolomit

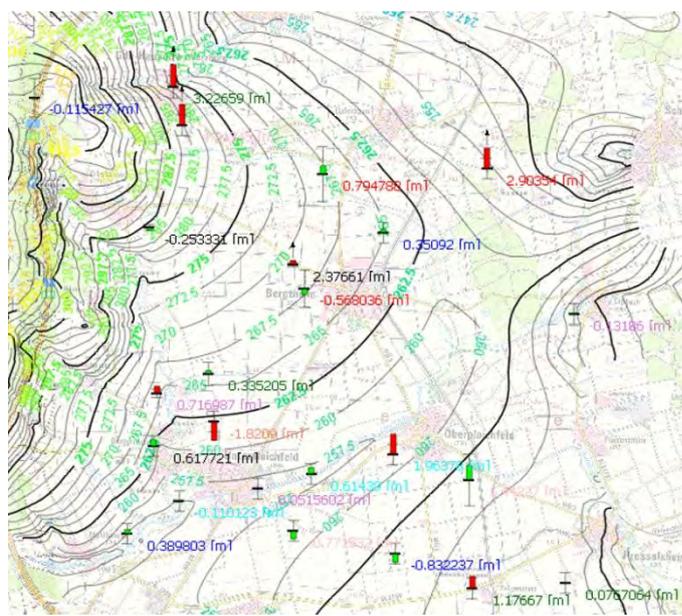


Abbildung 17: stationäre Kalibrierung, Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten, Werksandstein

Die gemessenen Quellaustritte stimmten überwiegend mit einer Toleranz von 2 m gut mit den berechneten Werten überein. Bei einzelnen Quellen zeigten sich stärkere Abweichungen >5m. Diese lagen v.a. an den Hanglagen der Muldenränder. Aufgrund der im Modell nur gering aufgelösten Topographie und mangelnder Kenntnis über die Art der Quellen (Hangschuttquellen, aufsteigende Quellen, Schichtquellen etc.) ist die Übereinstimmung akzeptabel.

Im Grenzdolomit wurden 17 Beobachtungspunkte zur Kalibrierung verwendet. Entsprechend der Verbreitung des Grenzdolomit konzentrieren sich die Punkte im Muldenzentrum. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Werten ist gut und liegt in allen Fällen unter 1 m.

Im KuW wurden 29 Beobachtungspunkte einbezogen. Hier sind die Übereinstimmungen ebenfalls gut. Größere Abweichungen gab es am Brunnen [redacted] am Brunnen [redacted] und [redacted]. Hier könnten unvollständige Entnahmedokumentationen und nicht berücksichtigte Entnahmen ursächlich sein. Die GWM WUE ku 1 zeigt zu geringe Differenzen zwischen kuD und kuW. Ein Grund ist hier die in der stationären Kalibrierung nicht abbildbare Dynamik. Im Zuge der nachfolgenden, instationären Kalibrierung wurde außerdem die Bedeutung der Trennschichten noch deutlicher, die bei der stationären Kalibrierung zunächst unterschätzt worden war.

Die Statistik-Gütemaße für die stationäre Kalibrierung wurden mit 1 % für die, über die Wasserspiegeldifferenz im Modellgebiet normalisierte mittlere Abweichung (MAE), einen root-mean square error von 1% und ein Linearitätsgütemaß R^2 von 0,988 ermittelt und liegen damit deutlich unter den Vorgaben von 5% (DVGW Merkblatt W 107). Die Kalibrierungsgüte ist damit als sehr gut zu bewerten.

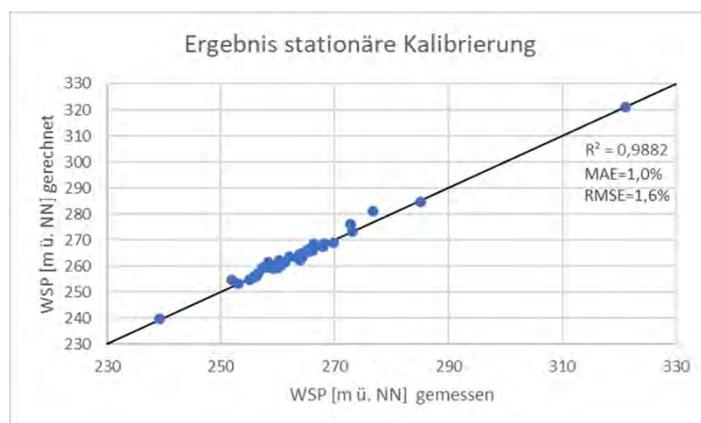


Abbildung 18: Ergebnis stationäre Kalibrierung gemessene vs. gerechnete Wasserspiegel

5.9.2 Instationäre gekoppelte Kalibrierung

Entgegen der ursprünglichen Planung wurde das Grundwassermodell zunächst mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell gekoppelt und im Anschluss instationär kalibriert. Der klimatische Einfluss konnte so wesentlich besser bereits bei der Kalibrierung berücksichtigt und technisch umgesetzt werden.

Die instationäre Kalibrierung erfolgte anhand der Aufzeichnungen an den 6 Doppelmessstellen des Sondernetzes im Würzburger Norden. Außerdem wurde die GWM MU11 bei Hausen mit einbezogen sowie die aus der Stichtagsmessung (Datengrundlagen 2-6) vorliegenden Daten und Wasserspiegel-Aufzeichnungen an einzelnen Brunnen (Datengrundlagen 3-2) berücksichtigt.

Im Zuge der Kalibrierung wurden die hydraulischen Durchlässigkeiten der geologischen Einheiten angepasst, außerdem wurden die Leakage-Koeffizienten der Gewässer in Teilbereichen justiert und die Leakage in den Oberen Muschelkalk reduziert.

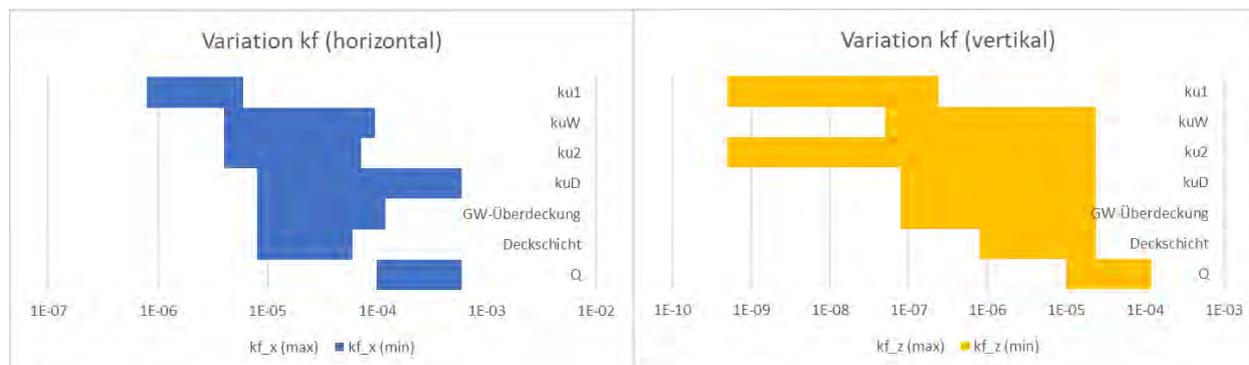


Abbildung 19: Bandbreite der kf-Variation im Rahmen der instationären Kalibrierung

Die k_f -Werte wurden dabei als horizontweise konstant angenommen und innerhalb der in Abbildung 19 dargestellten Bandbreiten variiert. Die Kalibrierung erfolgte durch eine Kombination aus automatisierter Kalibrierung mittels FePEST sowie händischer Anpassung der Parameter. Eine rein automatisierte Kalibrierung ist nicht sinnvoll, wenn die Anzahl der Freiheitsgrade durch die verschiedenen Schichten hoch ist und gleichzeitig die Beobachtungsmessstellen ungleichmäßig verteilt sind.

Im Mittel werden bei der instationären Kalibrierung die Grundwasserstände gut getroffen. Bei Betrachtung aller Beobachtungspiegel liegt der normalisierte MAE für jeden Modellzeitschritt unterhalb der vorgegebenen 5 %. Bei Betrachtung der Ganglinien der einzelnen Beobachtungsmessstellen zeigt sich, dass das Modell die innerjährlichen Schwankungen der Wasserspiegel (witterungsbedingt oder durch Brunnenbetrieb) teilweise nur unzureichend abbildet.

Hierfür gibt es mehrere Gründe, die vor allem in der Datengrundlage und der Modellkonzeption liegen:

- Modellschichten wurden weitgehend homogen parametrisiert
- Die GW-Entnahmen an den Brunnen werden aus den Monats-(teils Jahres-)werten auf die Tage verteilt, dadurch werden Spitzenentnahmen geglättet, ebenso wie Spitzenabsenkungen.
- Die Entnahmen im Modell erfolgt aus den (nach unserer Kenntnis) verfilterten Modellschichten. Hierbei werden immer die kompletten Modellschichten angesprochen. Da diese jeweils als homogen angenommen werden, wird jede Schicht entsprechend ihrer Transmissivität beansprucht. Geringmächtige, gut durchlässige Horizonte oder Klüfte werden nicht abgebildet.
- Einige Brunnen, die bis in den mo verfiltert sind, werden im Modell in ihrer Absenkung und schichtspezifischen Entnahme nur annähernd abgebildet.
- Die vertikale Auflösung des heterogen geschichteten Grundwasserleiters ist aufgrund mangelnder räumlich aufgelöster Kenntnis der Verhältnisse und numerischer Kapazitätsbegrenzungen (Anzahl Knoten, Rechenzeit) für die lokal relevanten Prozesse nur unzureichend.
- Zur Erreichung großer Absenktrichter und weiter Einflüsse der Brunnenabsenkung ist davon auszugehen, dass die Brunnen auf ein kleines aber weit reichendes Reservoir zugreifen – z.B. im Modell so nicht abgebildete geringmächtige Teilschichten des ku_W/ku_2 , Klüfte, etc.

An den Messstellen GMW 1 wird der ku_W als stärker gespannt berechnet als in der Realität beobachtet. Die Gründe hierfür sind unklar und liegen vermutlich in lokalen Wasserwegsamkeiten, eine Verbesserung war aber nur bei gleichzeitiger Verschlechterung der anderen Resultate erreichbar. An der GWM 6 wird die Druckpotentialdifferenz zwischen ku_D und ku_W in der Simulation unterschätzt. Differenzen wie hier von rund 10 m lassen sich numerisch kaum abbilden und würden eine höhere vertikale Auflösung erfordern.

Verschiedene Optionen zur Verbesserung der abgebildeten Dynamik wurden geprüft. Eine Verringerung des Speicherkoeffizienten wurde innerhalb der realistischen Grenzen getestet, ohne einen wesentlichen Effekt zu bringen. Eine Verringerung der Transmissivität der Grundwasserleiter, v.a. des ku_W bringt zwar in einigen Bereichen Verbesserung der Dynamik, wirkt sich aber insgesamt negativ auf die Abbildung des großräumigen Fließgeschehens aus und führt zum Trockenfallen einiger Brunnen und numerischen Instabilitäten.

Ein deutlicher Effekt war durch eine Zonierung der k_f -Werte zu erzielen. In Teilbereichen mit verringerter Durchlässigkeit wurden an den Brunnen größere Absenkungen erzeugt und damit die Dynamik an den benachbarten Beobachtungsmessstellen verbessert. Lokal verringerte vertikale hydraulische Durchlässigkeiten der Trennschichten führten zu einer stärkeren Stockwerkstrennung. Aus rein modelltechnischer Sicht kann damit ein optisch verbessertes Ergebnis an den Beobachtungspunkten erzeugt werden. Allerdings ergaben sich durch die verstärkten Durchlässigkeitskontraste numerischen Instabilitäten. Eine heterogene Verteilung der k_f -Werte ist bei dieser Geologie sehr wahrscheinlich, eine Zonierung lässt sich aber nicht aus Messwerten ableiten, sondern stellt eine reine Kalibriergröße dar. Damit wird im Modell eine erhöhte Genauigkeit/Detailtreue suggeriert, die sich nicht auf verfügbaren Input-Daten (z.B. Pumpversuche) begründet. Dies ist vertretbar, sofern ein (oder sehr wenige) Parameter zu variieren sind, während alle

anderen Variablen durch Messungen definiert sind und die Optimierungsfunktion eine eindeutige Lösung hat. Im vorliegenden Fall ergeben sich bereits durch wechselnden Grundwasserleiter und -stauer viele kf-Wert Kombinationsmöglichkeiten. Bei einer Zonierung ergeben sich für das Modell der Bergtheimer Mulde multiple Lösungsmöglichkeiten, die nicht durch Messung (kf-Werte) und Beobachtung (Messstellen) verifiziert werden können. Die Anzahl der Parameter, hier kf-Zonen, übersteigt die Anzahl der Beobachtungen. Die Optimierungsfunktion hat mehrere Minima und keine eindeutige Lösung („non-uniqueness“).

In Abwägung der modelltechnischen und numerischen Möglichkeiten und Einschränkungen wurde in Abstimmung mit dem AG auf eine Optimierung durch kf-Wert-Zonierung verzichtet. Die Erkenntnisse aus den Optimierungsversuchen wurden aber eingebunden.

Die ursprünglichen Modellziele können mit schichtspezifischen kf-Werten gut abgebildet werden, das Modell hat die gewünschte Aussagekraft im Hinblick auf Quantifizierung regionaler Bilanzkomponenten und bildet das Grundwasserströmungsbild gut ab. Lokale Aussagen sind aufgrund der Konzeption als Regionalmodell, der räumlichen Auflösung der Eingangsinformationen sowie auch des Modellgitters nur bedingt möglich.

Durch die Kalibrierung sollten beim finalen Modell die bestmöglichen Modellgütemaße, zumindest aber stets eine aussagekräftige, positive Korrelation zwischen den gemessenen und modellierten Zeitreihen zustande kommen.

- ✓ Die stationäre Kalibrierung zeigt sehr gute Ergebnisse (norm. MAE ca. 1% bezogen auf Stichtagsmessung)
- ✓ Gute bis sehr gute Abbildung der WSP im instationären Modell über den Betrachtungszeitraum (norm. MAE <5% bezogen auf alle Beobachtungs-GWM)
- ✓ Eine positive Korrelation im kuD erreichbar, wenn auch nicht immer in der gewünschten Größenordnung. Ein Problem stellt hier der Einfluss der Wasserspiegel der Oberflächengewässer dar, die im Modell mangels Daten als konstant angenommen werden, sodass sich Abflussveränderungen nicht im Grundwasser bemerkbar machen.
- ✓ Eine positive Korrelation im kuW ist an 5 von 6 GWM erreichbar. Der GWM 6 lässt sich die Dynamik zwar im Ansatz nachvollziehen, zeigt jedoch im Modell im Gegensatz zur Messung deutliche Unterschiede zur Dynamik des kuD.

Die aus der instationären Kalibrierung resultierende Parametrisierung ist in Kapitel 5.7 aufgelistet.

Der Vergleich der gemessenen mit den gerechneten Grundwasserganglinien an den Beobachtungsmessstellen liegt in Anlage 4.3 bei.

Die Modellergebnisse werden in Kapitel 5.10 im Überblick und 8.1 im Zusammenhang mit dem Landschaftswasserhaushaltsmodell vorgestellt.

5.10 Ergebnisse instationär kalibriertes Grundwassermodell

Die Grundwassergleichen in den beiden Hauptgrundwasserleitern kuD und kuW sind für das kalibrierte Modell in Abbildung 20 dargestellt. Die höchsten Wasserspiegel ergeben sich im Westen des Modellgebiets im Gramschatzer Wald, die niedrigsten Wasserspiegel in den nördlichen und südöstlichen Randbereichen des Modellgebiets. Zwischen Bergtheim und Schwanfeld liegt sowohl im kuD als auch im kuW eine Grundwasserscheide, von der aus das Grundwasser nach Süden und Norden abströmt. Ebenso findet sich eine Grundwasserscheide im Bereich der Landleite. Hier fließt das Wasser nach Osten in Richtung Main, bzw. nach Westen in Richtung Kürnach/Pleichach.

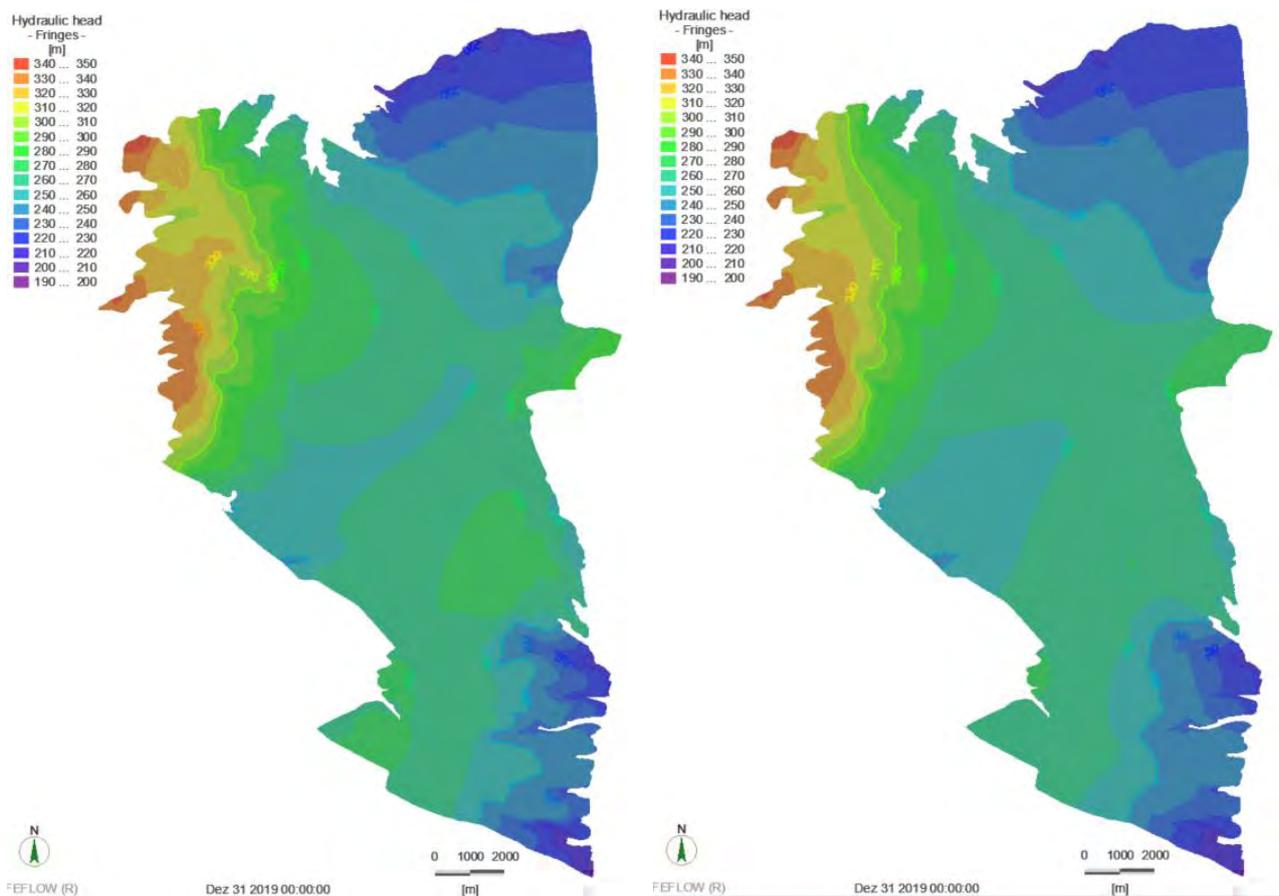


Abbildung 20: Grundwassergleichen Ende 2019 im kuD (links) und kuW (rechts)

Die Grundwasserflurabstände im Modellgebiet variieren stark. In Nähe der Gewässer und im Zentrum der Bergtheimer Mulde sind die Flurabstände gering. Zu den Muldenrändern nehmen sie tendenziell zu, wobei hier die modellierten Schichtmächtigkeiten (Unterer Keuper) abnehmen.

An den Gewässern im Gebiet herrschen überwiegend influente Verhältnisse vor, sodass sie als Vorfluter fungieren. Die zonierten Zu- und Abflüsse an den Gewässern sind in Abbildung 21 dargestellt. Wesentliche Veränderungen der Verhältnisse über den Simulationszeitraum sind nicht zu beobachten. Die grün dargestellten Abschnitte repräsentieren teils wechselnde in jedem Fall aber sehr geringe Austauschströme. Da die Gewässerrhöhen im Modell fixiert sind, können grundwassernahe Gewässerabschnitte mit starken Wasserspiegelschwankungen nur bedingt abgebildet werden und die ermittelten Austauschraten haben orien-

tierenden Charakter. Die Gesamtabflüsse einzelner Gewässer(abschnitte) wurden allerdings über die Abflussberechnungen aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell, bzw. dem gekoppelten Landschaftswasserhaushaltsmodell überprüft und plausibilisiert.

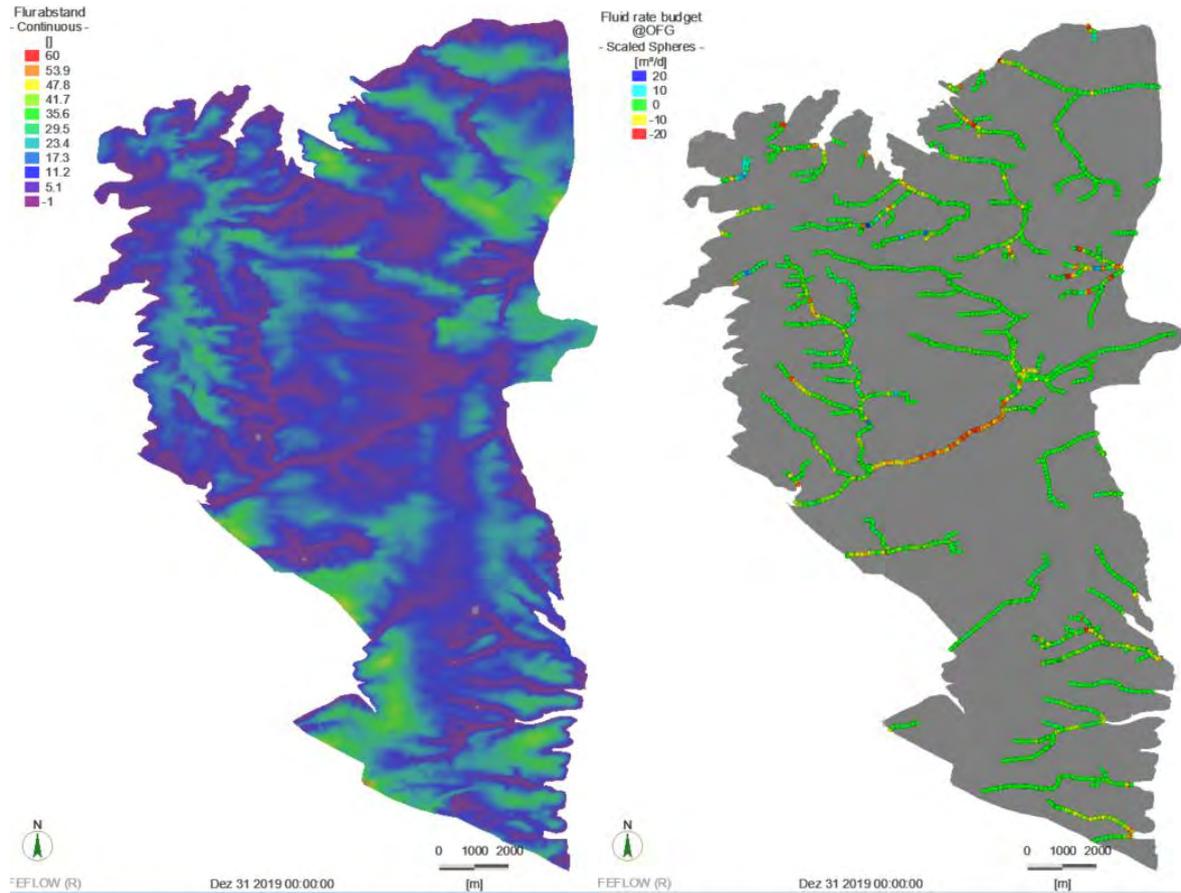


Abbildung 22: Grundwasserflurabstand in Metern

Abbildung 21: Effluente (positiv) und influente (negativ) Verhältnisse an den Gewässern

Das kalibrierte Modell zeigt eine gute Aussagekraft für den zentralen Bereich der Bergtheimer Mulde. In den Randbereichen nimmt die Aussagegenauigkeit ab. Durch die Muldenstruktur kommt es hier vermehrt zu trockenfallenden Schichten, die im Grundwassermodell aus numerischen Gründen schwieriger abzubilden sind. Da die meisten Brunnen im zentralen Modellgebiet lokalisiert sind, beschränken sich die Referenzpunkte in den Randbereichen der Mulde häufig auf Quellen, deren Anbindung an den/einen Grundwasserleiter unklar ist, es kann sich hier teilweise auch um Schichtquellen handeln. Brunnen in den Randbereichen der Mulde sind häufig unmittelbar an Gewässern lokalisiert, sodass an den dort gemessenen Wasserspiegeln ein Uferfiltrateinfluss nicht auszuschließen ist und/oder reichen bis in den Oberen Muschelkalk, sodass auch hier wieder eine Beeinflussung der Wasserspiegel zu erwarten ist. Besonders kritisch sind Bereiche, an den Brunnen nahe am Modellrand liegen (äußerer Modellrand, austreichende Schichten des Unteren Keupers) deren Einzugsgebiet durch die Modellgrenzen beschränkt wird. Aufgrund der Randeffekte, die bei jedem Modell mehr oder weniger stark auftreten, sollte der Aussagebereich (hier zentrale Bergtheimer Mulde) mit Schwerpunkt der Bewässerung stets ausreichend vom Modellrand entfernt liegen.

Der Kalibrierzeitraum von 2012(bzw. 2013)-2019 für den gemessene Ganglinien der 6 Doppelmessstellen vorliegen fällt innerhalb des Simulationszeitraums (2005-2019) in eine Periode mit niedriger Grundwasserneubildung. Entsprechend sind hier tendenziell sinkende Grundwasserspiegel zu beobachten. Diese werden im kalibrierten Modell so auch abgebildet. Dies betrifft vor allem die höher gelegenen Bereiche an den Muldenrändern. Bei den vergleichsweise trockenen Verhältnissen mit geringer Grundwasserneubildung und negativer Grundwasserbilanz laufen die Aquiferspeicher langsam leer. Das Grundwasser folgt dabei dem hydraulischen Gefälle hin zum Muldenzentrum. Im Muldenzentrum fallen die klimatischen Effekte daher weniger ins Gewicht. Inwieweit das Leerlaufverhalten im Modell ausreichend erfasst wird, ist besonders in den tieferen Grundwasserleitern erst über einen längeren Zeitraum und idealerweise bei einer (zeitweisen) Trendumkehr auszumachen. Die aktuellen Kalibrierungsergebnisse zeigen über den Kalibrierzeitraum eine gute Trendabbildung. Feuchtere Verhältnisse werden in der Kalibrierung nicht direkt abgebildet. Sollten sich die Verhältnisse künftig, zumindest über einige Jahre, wieder hin zu mehr Niederschlägen verschieben, sollte dieser neue Zeitraum mit veränderten Verhältnissen zu einer Modellkalibrierung genutzt werden.

5.11 Zusammenfassung Grundwassermodell

Das kalibrierte Grundwassermodell zeigt eine sehr gute Abbildung der Grundwasserhöhen über das Modellgebiet. Die Trends werden abgebildet. Die lokale Dynamik, insbesondere durch Grundwasserentnahmen wird ebenfalls abgebildet, allerdings häufig nicht in der real beobachteten Intensität, was mit der Konzeption des Regionalmodells und den damit verbundenen, notwendigen räumlichen Aggregationen zusammenhängt, sowie ein teils beschränkter Datengrundlage.

Die Aussagekraft einer Modellierung bedingt sich durch die Verteilung, Qualität und Repräsentativität der Eingangsdaten, der Modellkonzeption und der technischen Umsetzung/Umsetzbarkeit. Für das Modell der Bergtheimer Mulde ergeben sich folgende Limitationen:

Limitationen der Datengrundlage:

- Genaue Höhe und Mächtigkeit der geologischen Schichten in vielen Bereichen unklar
- Kf-Verteilung je Schicht unbekannt
- Brunnenausbau und Absperrung nur teilweise bekannt
- Entnahmemengen/-verteilung teilweise approximiert
- Lage, Versatz und hydr. Funktion von Störungen nicht überall klar

Limitationen aus der Modellkonzeption als Regionalmodell:

- Die Berechnungseinheiten (Finite Elemente) stellen repräsentative Einheitsvolumina dar und approximieren den heterogenen, geklüfteten Keuper als Porengrundwasserleiter, wodurch sich eine Glättung der lokal differierenden Eigenschaften ergibt.
- Das Regionalmodell ist auf Regionalskala zutreffend, auf Lokalskala aber unscharf.

Limitationen des numerischen Modells:

- Abbildung vieler Quellen/Senken (Gewässer, Brunnen) erfordert hohe Knotenanzahl
- Verfeinerung an steilen hydraulischen Gradienten erforderlich (Brunnen, Gewässer, GW-Stauer)
- Anzahl der Knoten und Finiten Elemente aufgrund der Rechenkapazität begrenzt

Trotz der jeder Modellierung inhärenten Limitationen wurden die Modellziele erreicht:

- Das Modell soll in der Lage sein relevante Wasserhaushaltsgrößen zeit- und ortsabhängig zu berechnen
 - ✓ Die Wasserhaushaltsgrößen können mit hoher zeitlicher Auflösung nach Teilgebieten berechnet werden, auch wenn die räumliche Auflösung durch das numerische Gitter und die modelltechnische „Homogenisierung“ der heterogenen Realität begrenzt ist
- Dies umfasst mindestens die Parameter Bodenwassergehalt, Sickerwasserrate, Evapotranspiration, Grundwasserstände und -strömungsrichtungen, sowie die oberirdischen und unterirdischen Zustrom- und Abflusskomponenten qualitativ und quantitativ
 - ✓ Mittlere Grundwasserstände werden über den Gesamttraum sehr gut (norm. MAE ca. 1%) wiedergegeben, ebenso die Strömungsrichtungen (Gleichenplan)
 - ✓ Durch gute Modelleingrenzung als Gesamt-GW-Körper ergeben sich sehr zuverlässige Zu- und Abströme
 - Ausnahme: Abstrom mo, kann nur abgeschätzt und kalibriert werden
- Nach Möglichkeit Unterteilung des Unteren Keuper in Grundwasserstauer und Grundwasserleiter
 - ✓ Unterteilung ist erfolgt in 4 Haupteinheiten (ku1, kuW, ku2, kuD)
 - ✓ Ohne Unterteilung wäre abgesehen von GWM 4 keine instationäre Kalibrierung an der Dynamik der GWM möglich, an GWM 5 und 6 immense Niveaudifferenzen könnten nicht abgebildet werden
 - Regional liegen mäßige, lokal schlechte Datengrundlagen für Unterteilung vor, was regional zu einer guten Aussagequalität, lokal zu einer schlechten Aussagequalität führt
- Das Modell muss in der Lage sein, das mittlere Grundwasserstandsniveau zu treffen, sowie die Schwankungen der Variablen im zeitlichen Verlauf und das Leerlaufverhalten des Aquifer-Systems sicher nachzuzeichnen
 - ✓ Das mittlere Niveau wird sehr gut getroffen, Schwankungen sind im Regionalmodell naturgemäß gedämpft
 - Die Schwankungen werden bedingt abgebildet – hier spielen z.B. Klüftzonen eine Rolle, sowie die WSP-Schwankungen der Gewässer, die nicht im Modell erfasst sind
- Durch die Kalibrierung sollen beim finalen Modell die bestmöglichen Modellgütemaße (in Kalibrierungs- und Validierungszeiträumen) erzielt werden, zumindest aber stets eine aussagekräftige, positive Korrelation zwischen den gemessenen und modellierten Zeitreihen zustande kommen.
 - ✓ Stationäre Kalibrierung mit sehr guten Ergebnissen (norm. MAE ca. 1% bezogen auf Stichtagsmessung)
 - ✓ Gute bis sehr gute Abbildung der WSP im instationären Modell über den Betrachtungszeitraum (norm. MAE <5% bezogen auf GWM)
 - ✓ Positive Korrelation im kuD erreichbar
 - ✓ Positive Korrelation im kuW 5 von 6 GWM erreichbar

6 Bodenwasserhaushaltsmodellierung

6.1 Das Simulationsmodell ArcEGMO

ArcEGMO (Pfützner 2002, Becker et al. 2002) ist eine hydrologische Toolbox, mit der alle wesentlichen Komponenten des Gebietswasserhaushaltes von den Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre-Vegetation-Boden bis hin zu den ober- und unterirdischen Abflusskonzentrationsprozessen bei Berücksichtigung von anthropogenen Steuerungen und natürlichen Störungen beschrieben werden können. Je nach Datenverfügbarkeit, Anwendungsmaßstab und Fragestellung können adäquate Teilprozessmodelle zu einem Gebietsmodell verknüpft werden. Dabei ist auch eine Kopplung mit externen Modellen (Klima, Grundwasser, Hydraulik, etc.) über diverse Schnittstellen möglich (Abbildung 23). Eine ausführliche Modellbeschreibung inklusive diverser Anwendungsbeispiele und der aktuellen Modellweiterentwicklungen findet sich unter www.arcegmo.de.

Die Berechnung des Bodenwasserhaushaltes und der Grundwasserneubildung/Versickerung erfolgt in diesem Projekt mit dem ökohydrologischen Abflussbildungsmodul PSCN (Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model; Klöcking, 2009) im Rahmen von ArcEGMO. Dieses Modell entstand durch die Kopplung verschiedener Wachstumsmodelle für wald- und landwirtschaftliche Flächen mit einem detaillierten Bodenmodell und erlaubt somit die Simulation der saisonal wechselnden Wirkung der Vegetation auf den Landschaftswasserhaushalt. Für Szenariosimulationen muss die Dynamik der Vegetationsdecke explizit in Abhängigkeit von der Witterung und den übrigen Standortbedingungen simuliert werden. Dafür wird ein generisches Wachstumsmodell auf der Grundlage eines Wärmesummenansatzes zur Simulation der phänologischen Entwicklung genutzt. Dieses basiert auf dem EPIC-Wachstumsmodell (Williams et al., 1989), das auch als vereinfachte Version in SWAT2005 (Neitsch et al., 2005) enthalten ist.

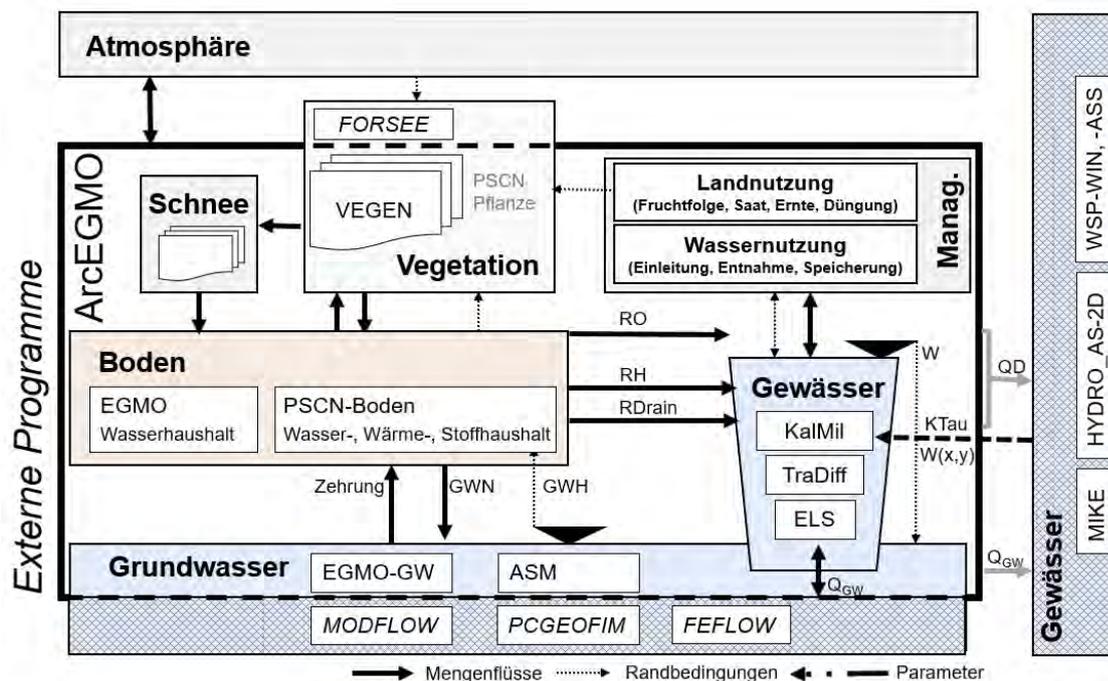


Abbildung 23: Modellkomponenten in ArcEGMO und Schnittstellen zu externen Programmen

Als treibende klimatische Größen werden Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung in täglicher Auflösung verwendet, die durch die in ArcEGMO integrierten Regionalisierungsverfahren aus den Stationsdaten für jedes simulierte Raumelement berechnet werden. Alternativ können auch Rasterdaten, z.B. des Deutschen Wetterdienstes DWD, verwendet werden.

Das Modell unterscheidet zwischen folgenden Abflusskomponenten, die in ihrer räumlichen und zeitlichen Genese simuliert und ausgewertet werden können (Abbildung 24):

- Oberflächenabfluss von nicht an das Kanalnetz angeschlossenen versiegelten und unversiegelten Flächen,
- Kanalisationsabfluss von versiegelten und teilversiegelten Flächen (Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsflächen), unterteilt in Misch- und Trennkanalisationsabfluss,
- hypodermischer Abfluss aus der Bodenzone (Interflow über geneigten Stauhorizonten),
- Drainabfluss,
- schnelle Grundwasserkomponente,
- langsame Grundwasserkomponente (Basisabfluss),
- Nassflächenabfluss (-zehrung).

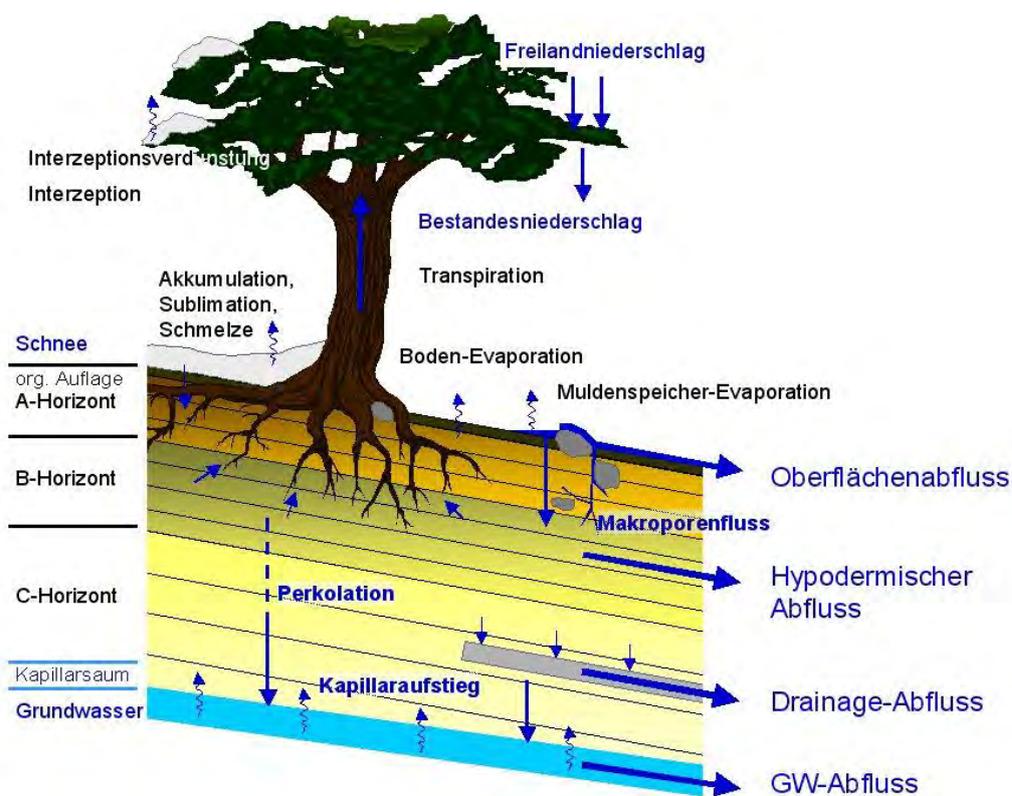


Abbildung 24: Simulation der Abflussbildung in ArcEGMO-PSCN

Die Simulation der primär lateral gerichteten Prozesse untergliedert sich in die Modellierung der Konzentration des Oberflächenabflusses, der Grundwasserdynamik sowie der Abflussprozesse in den oberirdischen Gewässern. Letztere werden durch systemhydrologische Ansätze (Speicher-kaskaden, Kalinin-Miljukov-Verfahren von Rosemann und Vedral, 1971) auf Basis der Fließgewässerabschnitte und der diesen zugeordneten Teileinzugsgebieten modelliert. Insbesondere in größeren Gebieten mit der Möglichkeit, über Pegelmessreihen eine Modellkalibrierung vorzunehmen, haben sich hierfür Speicheransätze bewährt. Diese werden u. a. über die Länge und das Gefälle des Vorfluters als maßgebende und leicht aus GIS¹¹-Daten ableitbare Eigenschaften für die sich ausbildende Abflussdynamik parametrisiert.

Für die Simulation der Konzentration des Landoberflächenabflusses zum Vorfluter wird die kinematische Welle angewendet. Dieser Ansatz beschreibt die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der aktuellen

¹¹ GIS: Geographisches Informationssystem

Effektivniederschlagshöhe, dem Geländegefälle und der Oberflächenrauheit (abhängig von der Flächennutzung). Beim ungekoppelten Einsatz von ArcEGMO wird die Grundwasserkomponente über mehrere Einzellinearspeicher in einem Einzugsgebiet erfasst, die in Abhängigkeit von der Oberflächenmorphologie und ihrer Entfernung zum Vorfluter ein unterschiedliches Zeitverhalten aufweisen.

Eine wesentliche Komponente des Modellierungssystems ArcEGMO bildet das Bewirtschaftungsmodul. Es ist in der Lage, Einleitungen, Entnahmen und Überleitungen über verschiedene Zeitfunktionen abzubilden. Die Funktion von Speichern kann je nach Bedarf und Datenverfügbarkeit als einfaches Retentionsglied zur Vergleichmäßigung des Durchflusses bis hin zur komplexen Steuerung von Talsperrenverbänden erfasst werden. Eine Beschreibung der einzelnen Teilmodelle gibt Pfütznern (2002).

Das GIS-Modell für ein LWHM mit ArcEGMO (Abbildung 25) besteht mindestens aus

- einer Karte der Fließgewässer mit ihren Einzugsgebieten,
- einer Hydrotopkarte (Elementarflächen),
- Lage der meteorologischen Stationen,
- Lage und Beschreibung von Gewässerbauwerken (Speicher, Einleitungs- und Entnahmestellen),
- Lage der Durchflusspegel

und den zugeordneten Zeitreihen und Parametern.

Die Hydrotope bzw. Elementarflächen haben einen festen Raumbezug und werden durch die Verschneidung der Basiskarten (Landnutzung, Böden, Teileinzugsgebiete, Drainflächen, etc.) gebildet. Sie sind durch eine bestimmte Eigenschaftskombination gekennzeichnet (in sich homogen).

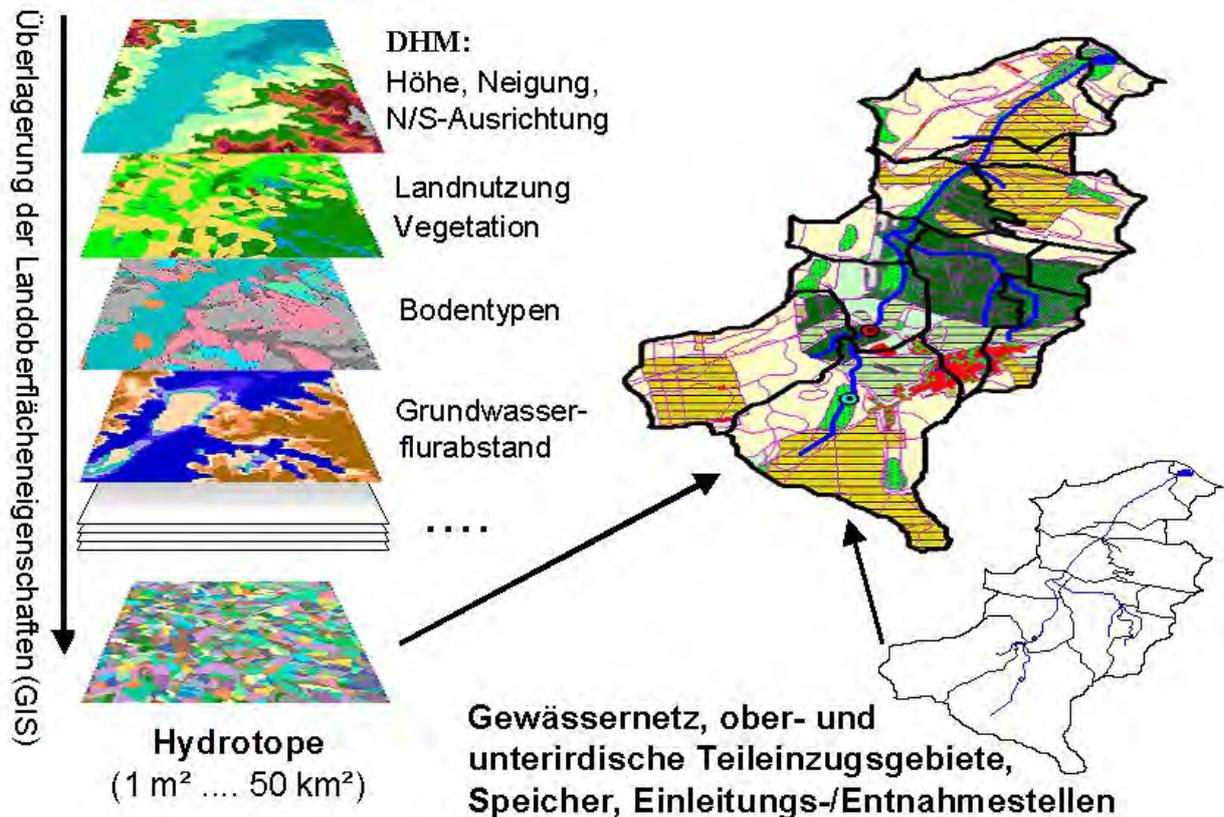


Abbildung 25: Räumliches Aggregationsschema von ArcEGMO

6.2 Erarbeitung des GIS-Modells für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung

6.2.1 Datenbasis und Raumgliederung

Im Rahmen dieses Projektes erfolgt die Modellierung mit einer Zeitschrittweite von 24 Stunden auf Elementarflächenebene. Die Elementarflächen haben einen festen Raumbezug innerhalb des Untersuchungsgebietes. Sie werden als in sich homogen hinsichtlich folgender Gebietseigenschaften betrachtet:

- Bodentyp,
- Landnutzung bzw. Vegetation,
- Mittlerer Grundwasserflurabstand,
- Hangneigung,
- Hangausrichtung,
- Geländehöhe über NN.

Im ersten Arbeitsschritt wurde die vom AG zur Verfügung gestellten Datengrundlage hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes mit ArcEGMO-PSCN gesichtet. Aus der umfangreichen Datenbasis flossen in den Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells (BWHM) neben den qualitativen und quantitativen Daten folgende Basiskarten ein (Tabelle 6):

Tabelle 6: Basiskarten

Thema	Karte	Nutzung
Höhenmodell	DGM5_20200715	Input
Topographische Karte	TK25	Kontrolle
Gewässernetz	FGsystem_Auswahl_2016	Input
Einzugsgebiete	Einzugsgebiete_Kategorie_08	Input
Boden	ÜBK25	Input
Vegetation, Landnutzung, Bewässerung	TK25	Input
	ATKIS-Landnutzung Ordner Gewässer, Siedlung, Vegetation und Verkehr	Input
	InVeKoS-Shapefiles für die Jahre 2005, 2007, 2010, 2013, 2015, 2017 und 2019	Input
	Lage und Fördermenge der Brauchwasserbrunnen (Zuarbeit R&H Umwelt)	Input
	3.3 und 3.4 Landwirtschaftliche Bewässerung\GIS-Daten Brunnen\Flurstücke zu relevanten Landwirten\	Input
Lage der Messstationen	Meteorologie (Quelle: Deutscher Wetterdienst DWD, Agrarmeteorologischer Dienst Bayern AMD)	Input
	REGNIE-Niederschlagsraster (DWD)	Input
	Gewässerdurchflusspegel: Geplante Abflussmessungen Offizielles Pegelmessnetz WWA AB	Input Info

Trotz Überarbeitung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) enthält das Höhenmodell Brüche, z.B. an Gebäuden etc. Da sich dadurch unrealistische Hangneigungswerte ergeben würden, erfolgte vor der Weiterverarbeitung eine Aggregation auf ein 50 m-Raster (identisch zur Raumgliederung des BWHM).

Entsprechend der Absprachen zwischen den Projektpartnern und dem AG wurde das Raummodell für das gesamte Untersuchungsgebiet (ohne Lücken) erarbeitet. Da diese Karte auf der geologischen Kartierung beruht, sind die Ränder sehr inhomogen. Die Grenze schneidet zumeist die oberirdischen Gewässereinzugsgebiete. Jedoch liegen die Einzugsgebiete der im Rahmen des Projektes neu installierten Pegel an der Pleichach in Mühlhausen, an der Kürnach östlich der Gießmühle sowie am Schernauer Bach zwischen Schernau und Brück komplett im Modellgebiet.

Ziel des gekoppelten Landschaftswasserhaushaltsmodells ist es, künftig die Grundwasserentnahmen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf Quellen, Oberflächengewässer und Feuchtfelder zu optimieren. Aus den Simulationen und berechneten Szenarien sollten sich Vorschläge zum Betrieb vorhandener Brunnen ableiten lassen. Hinsichtlich der Bodenwasserhaushaltsmodellierung bedeutet dies, dass die landwirtschaftlichen Flächen möglichst detailliert erfasst werden müssen, um die Rückkopplung zwischen ihrer Bewirtschaftung (angebaute Fruchtarten) und dem Bewässerungsbedarf abbilden zu können. Neben dem hohen Umfang an teilschlagspezifischen Bewirtschaftungsdaten muss auch der Variabilität der Teilschlaggrenzen Rechnung getragen werden. Das ist mit einem polygonbasierten Raummodell nur schwer zu leisten. Deshalb wurde ein rasterbasiertes Modell mit einer Gitterweite von 50 m (Basisraster) aufgebaut. Diese feine Raumgliederung erlaubt eine adäquate Abbildung des Fruchtartenspektrums auf den landwirtschaftlichen Flächen. Die übrigen Flächen wurden bei der Erarbeitung des ungekoppelten BWHM je nach räumlicher Variabilität der Gebietseigenschaften zu größeren Polygonen zusammengefasst, um die Handhabbarkeit (Rechenzeiten) des Modells zu verbessern (s. Abbildung 26, links).

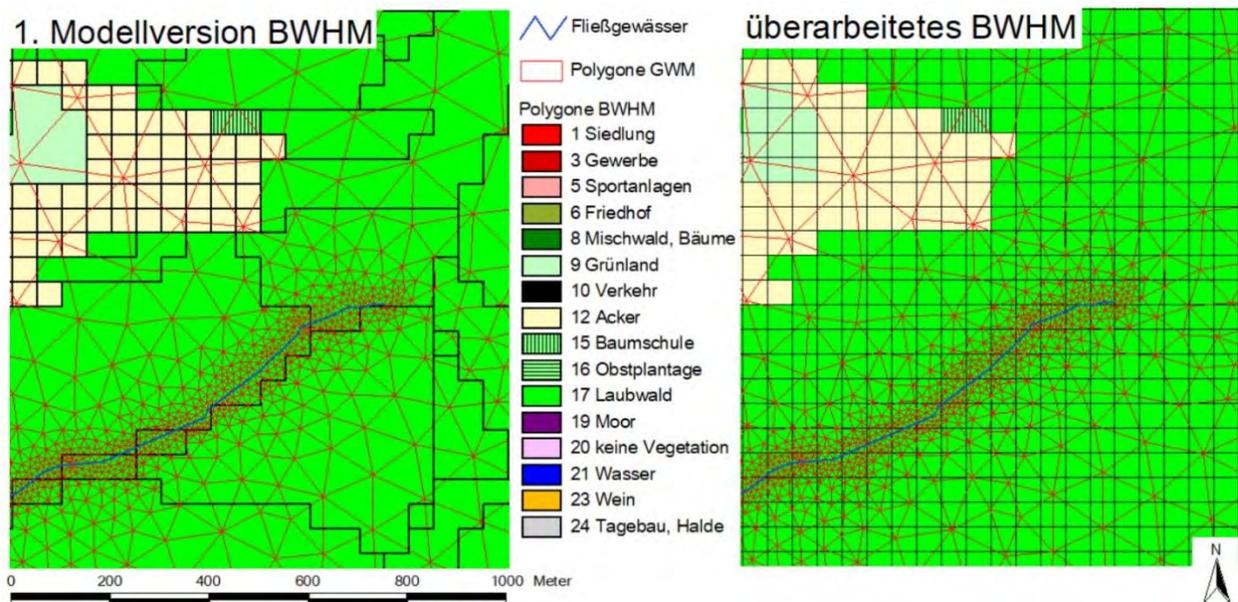


Abbildung 26: Raumlagerung von BWHM und Grundwassermodell (GWM), Detail im Gramschatzer Wald

Im Rahmen der Kopplung von BWHM und Grundwassermodell (GWM) zeigte sich jedoch, dass besonders in der Nähe von Fließgewässern diese Aggregation zu Problemen führt. Deshalb wurde im Zuge der Anpassung beider Modelle das Hydrotopraster des BWHM wieder auf eine einheitliche Zellweite von 50 m gesetzt. Nach Abgleichung des Modellumgriffs mit dem GWM enthält die Hydrotopkarte 85.015 Einzelflächen.

Jeder dieser rasterförmigen Elementarflächen (Hydrotope) wurde die flächenmäßig dominierende Landnutzung (Kap. 6.2.3), der Bodentyp (Kap. 6.2.5) und als Flächenmittel die topographischen Eigenschaften (Geländehöhe, Hangneigung und –ausrichtung) aus dem aggregierten DGM5 sowie die mittleren Grundwasserflurabstände zugeordnet.

6.2.2 Fließgewässernetz mit Teileinzugsgebieten

Aus den vorhandenen Basiskarten (FGsystem_Auswahl_2016.shp, Einzugsgebiete_Kategorie_08.shp) wurden alle Fließgewässerabschnitte und Teileinzugsgebiete selektiert, die das Untersuchungsgebiet schneiden. Das Gewässernetz wurde bereinigt, d.h. Pseudonodes entfernt und die Fließrichtung kontrolliert und korrigiert. Den Fließgewässerabschnitten wurden Höhen und Gefälle aus dem Höhenmodell (DGM5) zugewiesen. Sie und ihre Teileinzugsgebiete wurden hierarchisiert (Oberlieger-Untерlieger-Zuordnung) und für die weitere Auswertung in Regionen zusammengefasst.

Die drei neuen Abflussmessstellen innerhalb des Untersuchungsgebiets wurden als Modellausgabepunkte berücksichtigt. Ebenso drei weitere Ausgabepunkte an der Pleichach und je einer am Grumbach und am Brumbach. Entsprechend der Struktur von Fließgewässern und deren Einzugsgebieten können jederzeit weitere Ausgabepunkte für die Bereitstellung simulierter Abflussganglinien definiert werden.

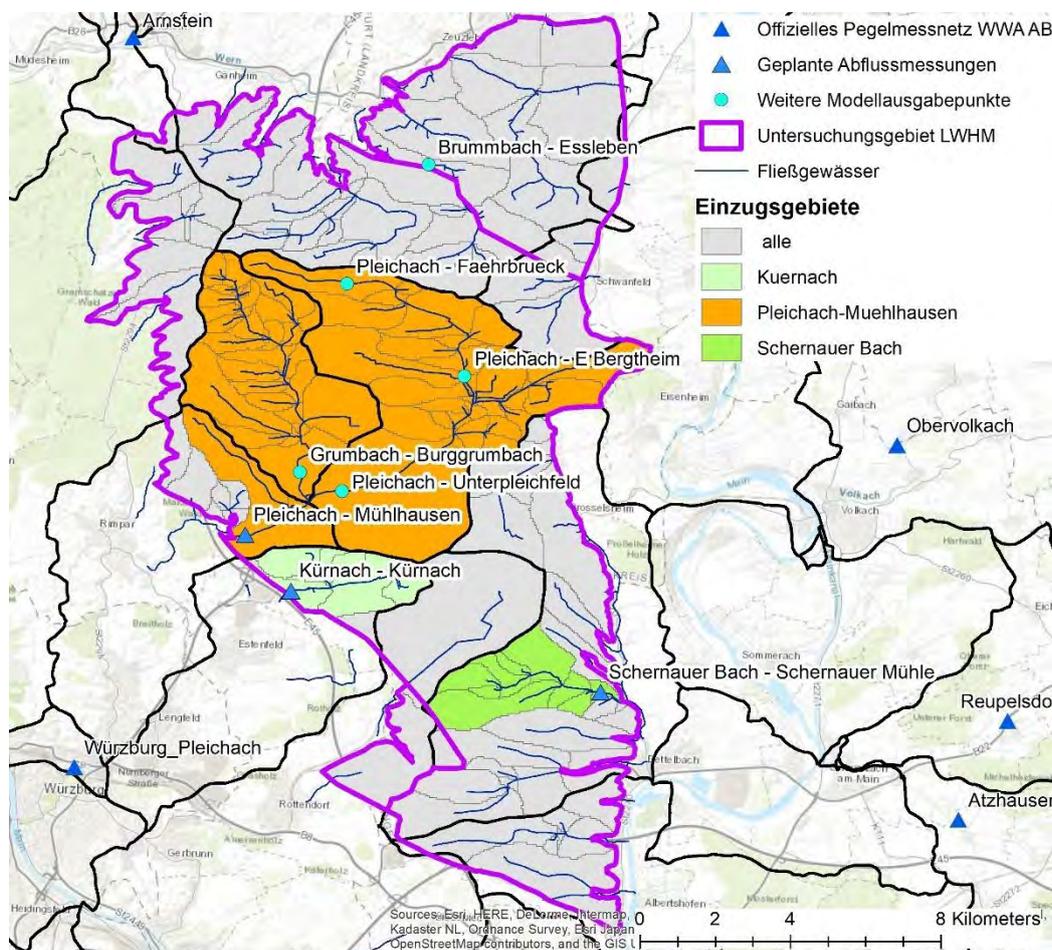


Abbildung 27: Fließgewässer, deren Einzugsgebiete und Abflusspegel der 1. Bearbeitungsstufe BWHM

Nach Festlegung der Außengrenzen des Untersuchungsraumes anhand der ersten Ergebnisse der stationären Grundwassermodellierung (Wegfall des Unsicherheitsbereiches Süd, geringe Korrekturen des Umfangs) wurden das Gewässernetz und die Einzugsgebiete auf die Außengrenzen gekappt. Das finale BWHM für den Untersuchungsraum des gekoppelten Landschaftswassermodells Bergtheimer Mulde enthält insgesamt 313 Fließgewässerabschnitte (FGW) in 163 Teileinzugsgebieten (TG).

Diesen Teileinzugsgebieten wurden die darin liegenden Hydrotope zugeordnet.

6.2.3 Landnutzung

Die Erfassung der Landnutzung im BWHM erfolgte in folgenden Schritten:

1. Klassifizierung der ATKIS-Daten (Tabelle 7), Erarbeitung eines modellspezifischen Parametersatzes für die einzelnen Landnutzungsklassen (Literatur- und Erfahrungswerte)
2. Zuweisung des dominierenden Landnutzungstyps zu den einzelnen Zellen des Hydrotop-Basisrasters
3. Berechnung und Zuweisung des von Straßen etc. eingenommene Flächenanteils zu den einzelnen Zellen des Basisrasters als Grundlage für die Ausweisung des versiegelten Flächenanteils vegetationsgeprägter Zellen,
4. Ausweisung von kanalisierten Flächen (Nutzungs-ID 1, 2, 3 und 10 als trennkanalisiert)
5. Analyse und Erfassung der Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen (Kapitel 6.2.4)

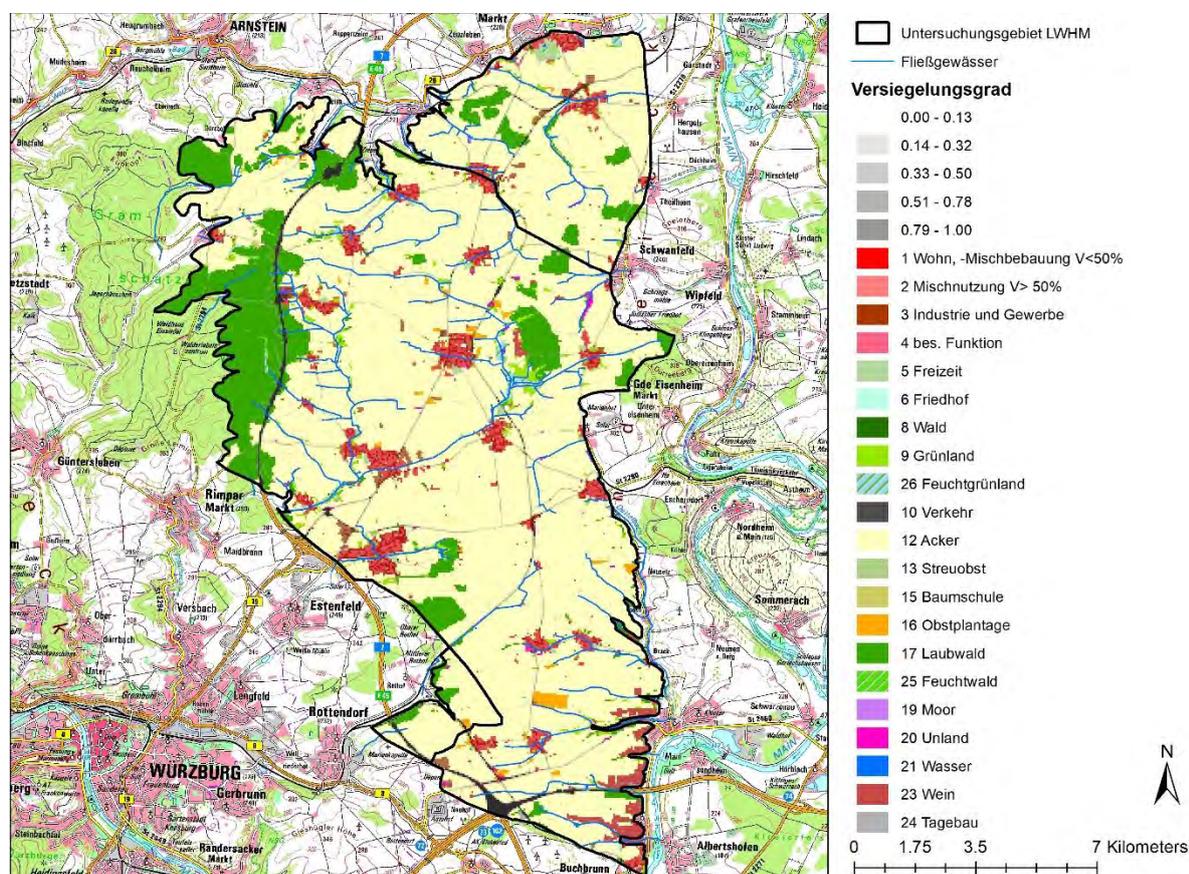


Abbildung 28: Landnutzung im Untersuchungsgebiet

Für die Nutzungstypen 1 und 3 wird ein Versiegelungsgrad von 30 % bzw. 60 % (bei gleichzeitigem Vorhandensein von Straßen) angenommen. Auf allen teilversiegelten Flächen, die nicht an die Trennkanalisation angeschlossen sind, wird der auf den versiegelten Flächen gebildete Oberflächenabfluss auf die unversiegelten Anteile weitergeleitet. Unsicherheiten ergeben sich vor allem bei der Beschreibung der Industrie- und Gewerbeflächen und der dem Nutzungstyp 10 zugeordneten Bahntrassen, da hier je nach eigentlicher Nutzung (z.B. als Solarpark) die oben getroffenen Annahmen nicht unbedingt zutreffen. Jedoch ist der Anteil dieser Flächen im Untersuchungsgebiet sehr gering, sodass diese Modellunsicherheit in Kauf genommen wird.

Im Rahmen der Modellüberprüfung wurden zwei neue Landnutzungsklassen eingeführt. Wald- und Grünlandflächen auf grundwasserbeeinflussten Standorten wurden als Feuchtwald (ID 25) bzw. -grünland (ID 26 in Tabelle 7) mit einer geringeren Durchwurzelungstiefe parametrisiert.

Tabelle 7: Klassifizierung der ATKIS-Objektarten (AdV, 2008) in Modell-Landnutzungstypen (ID)

ID	Kennung	Bezeichnung	ATKIS OBJA	OBJART_TXT
1	41001 41006	Wohnbaufläche, Fläche gemischter Nutzung offen	41001 41006	"AX_Wohnbauflaeche, AX_FlaecheGemischterNutzung"
2	41001_2 41006_2	Wohnbaufläche, Fläche gemischter Nutzung Versiegelung>50%	41001 41006	"AX_Wohnbauflaeche, AX_FlaecheGemischterNutzung"
3	41002	Industrie-/Gewerbefläche	41002	"AX_IndustrieUndGewerbeflaeche"
4	41007	Fläche besonderer funktionaler Prägung	41007	"AX_FlaecheBesondererFunktionalerPraegung"
5	41008	Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche	41008	"AX_SportFreizeitUndErholungsflaeche"
6	41009	Friedhof	41009	"AX_Friedhof"
7	42001 42010	Straßen-, Bahnverkehr	42001 42010	"AX_Strassenverkehr, AX_Bahnverkehr"
8	1023 1300 43003	Baumbestand, Laub- und Nadelholz	42001 43002 43003	"AX_Strassenverkehr (1023), AX_Wald (1300), AX_Gehoelz"
9	1500,1020	Gras, Grünland	42001	"AX_Strassenverkehr (1500), AX_Landwirtschaft (1020)"
10	1303,1305 1307 42009	Straße, Platz	42003 42009	"AX_Strassenachse (Bundes-, Staats-, Gemeindestraße), AX_Platz"
11	42014	Bahnstrecke	42014	"AX_Bahnstrecke"
12	1010	Acker	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1010"
13	1021	Streuobstwiese	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1021"
14	1030	Gartenland	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1030"
15	1031	Baumschule	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1031"
16	1050	Obstplantage	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1050"
17	1100	Laubholz	43002	"AX_Wald, VEG 1100"
18	1200	Nadelholz	43002	"AX_Wald, VEG 1200"
19	43005 43006	Moor	43005	"AX_Moor", AX_Sumpf
20	43007	Vegetationslose Fläche	43007	"AX_UnlandVegetationsloseFlaeche"
21	44001 44006	Gewässer	44001 44006	"AX_Fliessgewaesser, AX_StehendesGewaaesser"
22	51006	Bauwerk oder Anlage für Sport, Freizeit und Erholung	51006	"AX_BauwerkOderAnlageFuerSportFreizeitUndErholung"
23	1040	Weinberg	43001	"AX_Landwirtschaft, VEG 1040"
24	41003 41005	Tagebau, Halde	41003 41005	AX_Halde, AX_TagebauGrubeSteinbruch
25	1100	Feuchtwald	"43002"	analog 17, aber andere Parametrisierung
26	1500,1020	Feuchtgrünland	"42001"	analog 9, aber andere Parametrisierung

6.2.4 Bewirtschaftung der Ackerflächen

Als Basis für die Analyse und Erfassung der Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen dienten die InVeKoS-Shapefiles für die Jahre 2005, 2007, 2010, 2013, 2015, 2017 und 2019. Problematisch bei der Nutzung dieser Daten ist, dass einerseits nicht lückenlos für alle Feldstücke Bewirtschaftungsangaben vorliegen, und sich andererseits die Teilschlaggrenzen über die Bewirtschaftungszeit verändern. Eine direkte Übertragung der InVeKoS-Daten in ortsgenaue Fruchtfolgen war somit nicht möglich.

Stattdessen erfolgte eine Untergliederung der Ackerflächen in Managementtypen entsprechend des in den einzelnen Regionen typischen Fruchtartenspektrums. Dazu wurde den 47.547 laut ATKIS ackerbaulich genutzten Elementarflächen im Kernuntersuchungsgebiet (ohne Unsicherheitsbereiche) die 2005, 2007, 2010, 2013, 2015, 2017 und 2019 angebauten Fruchtarten anhand einer räumlichen Verknüpfung mit den InVeKoS-Shapes zugewiesen. Entsprechend der Häufigkeit konnte so eine Zuordnung der einzelnen Flächen zu insgesamt 10 Managementtypen (Tabelle 8) erfolgen. Für die Unsicherheitsbereiche Nord und Süd, für die keine InVeKoS-Daten vorhanden sind, wurde bis auf wenige Ausnahmen (s. Kap. 6.2.7) eine Bewirtschaftung entsprechend des Managementtyps 2 (Getreide) angenommen. Dieser nimmt auch im Kerngebiet mit 64 % den größten Flächenanteil ein. Gemüseanbau dominiert im zentralen Bereich im Umkreis der Orte Bergtheim, Unter- und Oberpleichfeld (Abbildung 29).

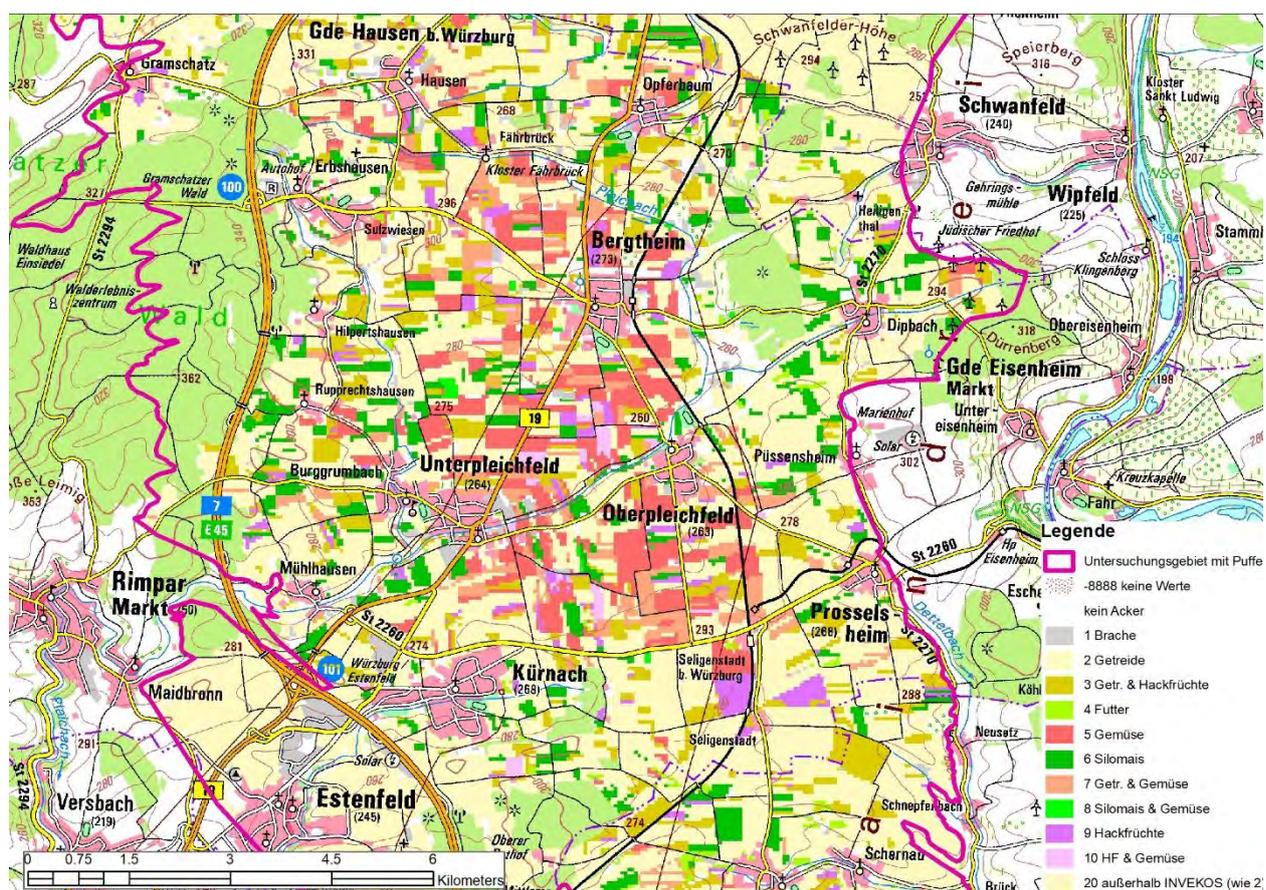


Abbildung 29: Zentralbereich des Untersuchungsgebietes mit Managementtypen der Ackerflächen

Tabelle 8: Managementtypen (MTyp) mit Flächenanteil und prozentualen Anteil der Hauptfruchtarten [%] und zugeordneter Fruchtfolge (FF)

MTyp	Beschreibung	Fläche [ha]	% Anteil	Stillleg./Gräser	Leguminosen	Mais	SoGetr	WiGetr	Rüben	Gemüse	WiRaps	Kartoffeln	FF
1	Stilllegung	220	1,7	80,0	2,5	2,7	1,6	10,3	0,4	0,6	1,4		1
2	Getreide	8349	64,0	2,7	1,3	10,6	6,9	58,6	10,8	2,2	5,7	0,4	2
3	Getreide & Hackfrüchte	1408	10,8	2,1	1,5	9,2	4,0	35,4	40,7	2,4	1,5	2,1	3
4	Futter (Energie)	157	1,2	19,0	32,1	13,1	4,6	18,1	6,3	3,0	0,6	1,1	4
5	Gemüse	929	7,1	1,0	6,7	11,0	1,6	12,4	10,4	51,0	0,3	3,3	5-7
6	Silomais (Energie)	888	6,8	2,6	1,9	52,1	2,4	27,6	9,5	0,9	2,6	0,3	4
7	Getreide & Gemüse	621	4,8	0,7	3,5	15,2	3,0	35,3	5,8	32,9	1,0	1,0	5-7
8	Silomais & Gemüse	26	0,2		3,1	52,3	2,0	3,3	5,1	30,3	0,9	0,2	8
9	Hackfrüchte	364	2,8	0,8	2,6	12,6	2,7	16,7	53,1	3,8	1,6	5,2	3
10	Hackfrüchte & Gemüse	88	0,7		2,6	5,8	1,0	13,1	34,9	33,4		9,2	5, 6, 8

Tabelle 9: Fruchtfolgen (FF), WiWe: Winterweizen, ZR: Zuckerrübe, ZMais: Zuckermais, KMais: Körnermais

FF	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6	Jahr 7	Jahr 8	Jahr 9	Jahr 10	Jahr 11	Jahr 12
1	WiWe	Brache	Brache	WiWe	Brache	Brache	Grünland	Grünland	Silomais	Brache	Brache	Brache
2	ZR	WiWe	Silomais	WiWe	WiGerste	WiWe	ZR	WiWe	WiGerste	Silomais	WiWe	WiRaps
3	Silomais	ZR	WiWe	Kartoffel	WiWe	WiGerste	ZR	WiWe	SoGerste	ZR	KMais	WiWe
4	ZR	WiWe	Silomais									
5	WiWe	Kleegras	Kartoffel	Möhre	ZMais	Kleegras	Kartoffel	Möhre	Kürbis	Möhre	Zwiebel	
6	Gurke	Kohl	Möhre	WiWe	ZR	WiWe						
7	Silomais	Kohl	Möhre	Gurken	WiWe	Kohl	Möhre	Gurken	ZR			
8	Silomais	ZR	Möhre	Kohl	Silomais	Zwiebel	ZR	Kohl	ZMais	Kürbis		

Pro Managementtyp wurde nun entsprechend der Häufigkeit der einzelnen Fruchtarten eine Fruchtfolge abgeleitet und mit ortsansässigen Landwirten abgestimmt. In diesem Zusammenhang zeigte sich, dass die Nutzung der nur für sieben der 15 Bewirtschaftungsjahre vorhandenen InVeKoS-Daten zu einer nur bedingt realistischen Fruchtartenverteilung in diesem Zeitraum führt. So würde z.B. der berechnete Rübenanteil von 53 % beim Managementtyp 5 zu einem aus phytopathologischer Sicht viel zu hohen Rübenanteil in der Fruchtfolge führen. Außerdem gibt es nur teilweise Informationen, welches Gemüse angebaut wird.

Deshalb wurden die Managementtypen weiter zusammengefasst und praktikable Fruchtfolgen aus Sicht der Bewirtschafter angesetzt (Tabelle 8, Tabelle 9). So wurden die Managementtypen 3 und 9 zusammengefasst und für diese die Fruchtfolge FF 3 abgeleitet, die sowohl Getreide, Mais als auch Hackfrüchte umfasst. Ebenfalls zusammengefasst wurden die Managementtypen 4 und 6 aufgrund ihres jeweils geringen Flächenanteils und diesen eine dreigliedrige „Energie“-Fruchtfolge (FF 4) entsprechend der Vorschläge der lokalen Landwirte zugewiesen. Den Flächen, die primär für den Gemüseanbau genutzt werden (MTyp 5, 7, 8 und 10) wurden insgesamt vier Fruchtfolgen zugeordnet. Somit kann auch der Unterschied zwischen konventionellen und ökologischen Gemüseanbau (FF 5) im Modell berücksichtigt werden. Zwischenfrüchte (z.B. Erbsen) werden nach Wintergetreide (WiWe, WiGerste) mit nachfolgender Sommerfrucht simuliert.

Alle einer Fruchtfolge zugeordneten Flächen wurden entsprechend der Anzahl n der Glieder der jeweiligen Fruchtfolge in n gleichgroße Klassen unterteilt. Jede dieser Klassen startet die Fruchtfolge in einem anderen Jahr. Somit kann bei der Modellierung die räumliche Verteilung der Fruchtarten erfasst werden.

Insgesamt sind in den Fruchtfolgen nur die im Untersuchungsgebiet am häufigsten angebauten Fruchtarten berücksichtigt: Winterweizen (WiWe), Zuckerrübe (ZR), Silomais, Wintergerste (WiGerste), Winterraps, Sommergerste, Körner- und Zuckermais, Kartoffel, Klee gras und Grünbrache. Von der Vielzahl der angebauten Gemüsearten wurden Möhren, Kohl, Gurken, Zwiebeln und Kürbis berücksichtigt. Sonderkulturen wie z.B. Zierpflanzen und Kräuter wurden aufgrund des geringen Anbauumfangs vernachlässigt.

Für diese Feldfrucht- und Gemüsearten wurden anhand der Angaben von Landwirten der Region und Literaturwerten anbauspezifische Kennwerte wie mittlere Saat- und Erntetermine sowie der Bewässerungsbedarf festgelegt. Hier sei noch einmal ausdrücklich [REDACTED], [REDACTED], [REDACTED] für die Beratung und Zusammenarbeit gedankt.

Eine Bewässerung wird für folgende Fruchtarten/Landnutzungen angenommen:

- alle Gemüsesorten,
- Kartoffel,
- Weinbauflächen,
- Obstplantagen,
- Saat zucht.

Mais und Rüben werden im Untersuchungsraum in der Regel nicht bewässert (Aussage [REDACTED]). Eine Ausnahme stellen die Saat zuchtflächen der [REDACTED] dar, die entsprechend den vorliegenden Protokollen in geringem Umfang bewässert werden. Diese Flächen wurden im Modell mit der Fruchtfolge 4, jedoch mit Bewässerung von Rübe und Mais (intern als Fruchtfolge 9 gespeichert), abgebildet.

Weitere, für die Modellierung erforderliche Vegetationsparameter dieser Fruchtarten wie z. B. die maximale Wurzeltiefe wurden aus der Literatur bzw. aus vergleichbaren Modellanwendungen (Klöcking et al., 2018) übernommen.

6.2.5 Böden

Als Basis für die Erfassung der Böden im GIS-Modell von ArcEGMO dient die Übersichts-Bodenkarte im Maßstab 1:25.000 (ÜBK25, Datengrundlage 1.9) für Bayern mit Flächendaten (Polygonshapenfiles mit Legendeneinheit) und Informationen zu Profil und Horizontdaten (TabHorizonte_gesamt.csv, TabProfile_gesamt.csv), unterteilt für Wald- und Nichtwald-Flächen der Legenden. Nach Zuordnung der Legendeneinheiten zu den einzelnen Zellen des Hydrotop-Basisrasters erfolgte die Zuordnung des nutzungsspezifischen Leitbodenprofils.

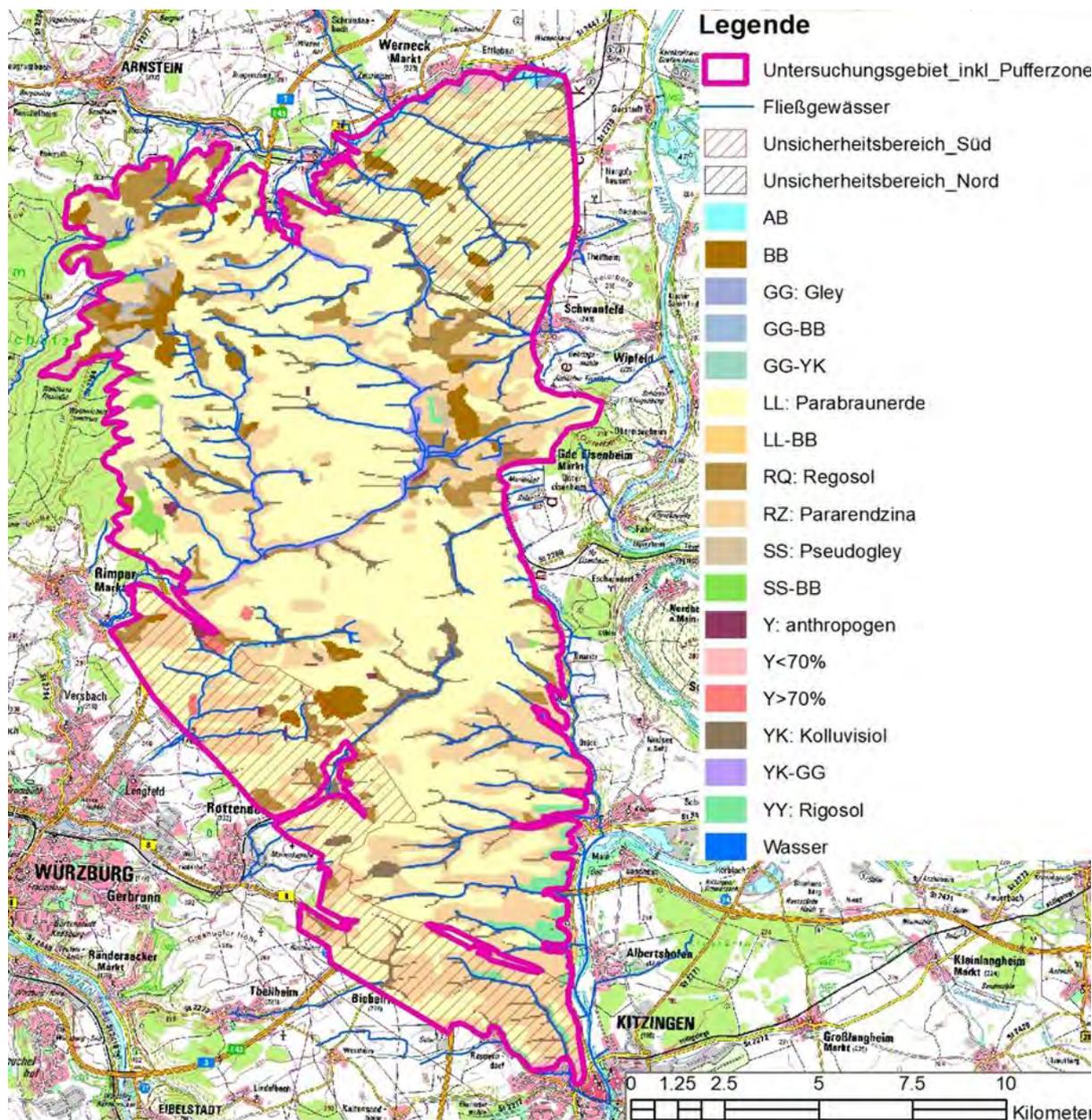


Abbildung 30: Bodentypen im Untersuchungsgebiet mit Unsicherheitsbereichen (AB: Vega, BB: Braunerde)

Legendeneinheiten liegen flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vor (Abbildung 30). Jedoch konnten 17 Legendeneinheiten kein nutzungsspezifisches Leitbodenprofil anhand der zur Verfügung gestellten Informationen zu Profil und Horizontdaten zugeordnet werden. Diese nehmen mit 3,5 % nur einen sehr kleinen Flächenanteil des finalen Modellgebietes ein und liegen zumeist in den Randgebieten, bzw. schon außerhalb des Modellraums des GWM (s. Abbildung 31, links, gelbe Markierungen).

Diesen Legendeneinheiten wurde je ein Leitbodenprofil entweder nach Ähnlichkeit oder entsprechend der benachbarten Flächen (besonders bei anthropogenen Böden) zugewiesen. Die Parametrisierung der Rigsole erfolgte auf der Basis von Messwerten (Weinbauregion Mainstockheim, Büro für Technik und Management im Wein- und Gartenbau). In Tabelle 10 sind die betroffenen Böden erfasst.

Tabelle 10: Bodenlegenden (LEG) ohne Leitprofil mit Alternativprofil, A: Flächenanteil im Gesamtgebiet, NF: nicht-forstlich, F: forstlich, W: Wein

LEG	A [ha]	Nutzung	Ersatz LEG	Ersatzprofil	Bemerkung	Hauptbodentyp
12b	132	NF	12b	2482	ÜBK25, Kartenblatt 6127	Kolluvisol
13a	66	NF	15a	2584		Pseudogley-Braunerde, Braunerde
16b	50	NF	15a	2584		Pseudogley und Braunerde-Pseudogley
89a	110	(F), NF	97a	2391	Nordrand	kalkhaltige Vega
91d	40		62e	4380	Nordrand	kalkhaltiger Auengley, Vega-Gley
447b	64	F, NF	4c 463a	3593 3577	Unsicherheitsbereich Nord	Braunerde
460a	6	F, NF	462b	3591	Randbereich	Regosol
467a	2	NF	467c	2345		Braunerde
467d	62	NF	467b	3576		(Para-)Braunerde
906	30	W		6	Messwerte	Rigosol
910	239	W		7	Messwerte	Rigosol
912	13	W		3	Messwerte	Rigosol
922	19	W		4	Messwerte	Rigosol
933	10		930	pseudo		Böden durch Abbau von Massenrohstoffen geprägt
935	30		930	pseudo		Böden auf Schutt- und Mülldeponien
997a	37				wie Nachbarn	Bebaute Flächen mit einem Versiegelungsgrad > 70%;
997b	95				wie Nachbarn	Besiedelte Flächen mit anthropogen überprägten Bodenformen

Ein Problem der Leitbodenprofile ist, dass die angegebene Tiefe abhängig von der Beprobung ist. Zur Vereinheitlichung wurde deshalb eine Profiltiefe von 2 m für alle nicht felsunterlagerten Böden angenommen. Die Dicke des jeweils untersten Horizonts wurde entsprechend angepasst. Wie Abbildung 31, linkes Bild, verdeutlicht, kann für das gesamte Modellgebiet mit dieser einheitlichen Bodentiefe gearbeitet werden. Allein an den Gebietsrändern treten felsunterlagerte Bereiche mit geringerer Profilmächtigkeit auf. Z.T. liegen diese schon außerhalb des Modellaums des GWM.

Die in der ÜBK25-Datenbasis nicht erfassten bodenphysikalische Parameter (z.B. gesättigte Leitfähigkeit k_f) werden modellintern anhand der KA5 (AG Bodenkunde, 2005) aus der Bodenart und der Trockenrohdichte für jeden Bodenhorizont abgeleitet. Abbildung 31, rechtes Bild, zeigt die so berechnete Durchlässigkeit des untersten Bodenhorizontes an der Schnittstelle zur ungesättigten Zone, die durch das GWM beschrieben wird.

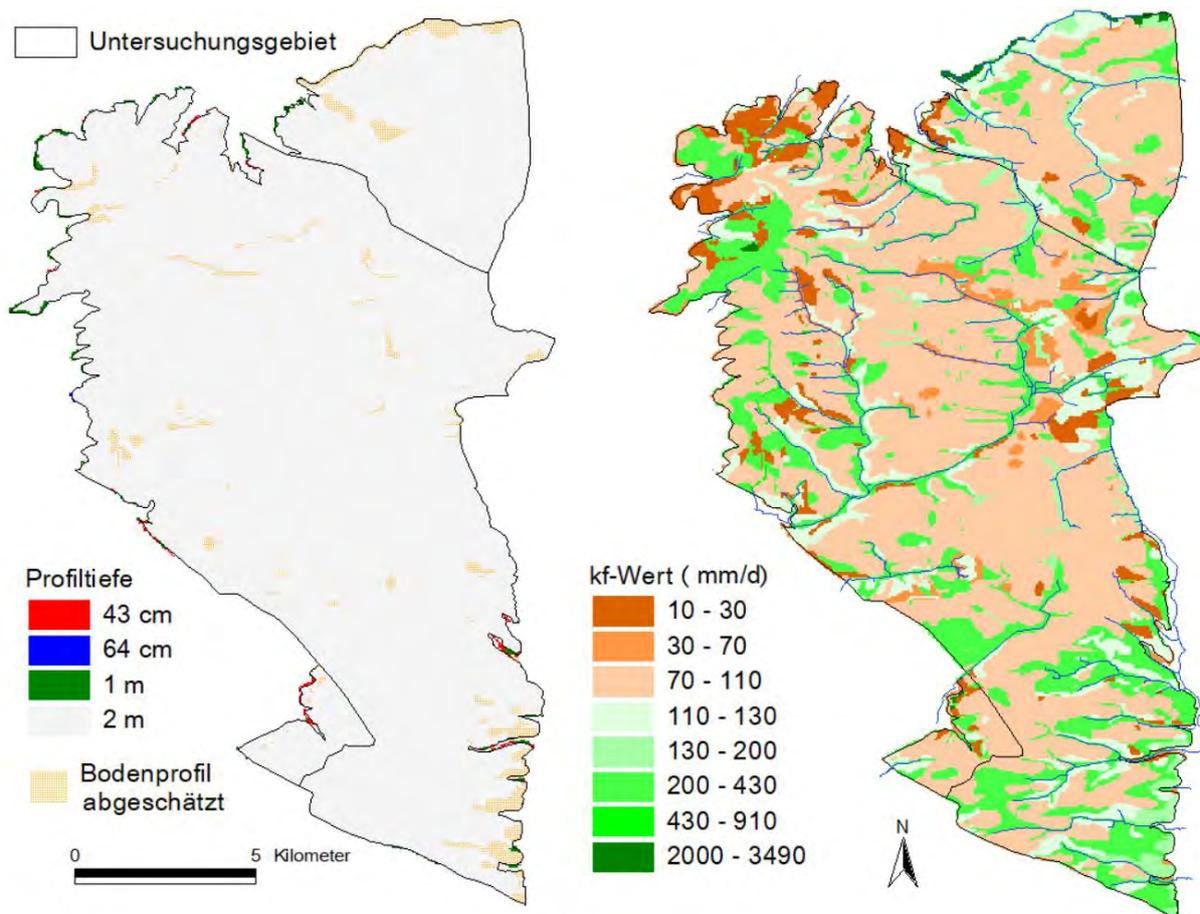


Abbildung 31: Profiltiefe (links) und gesättigte Leitfähigkeit kf des untersten Bodenhorizonts

Drainagen haben einen beachtlichen Einfluss auf den Wasser- (und Stoff-)haushalt eines Gebiets, da über diese schnelle Abflusskomponenten generiert werden. Die Erfassung in ArcEGMO-PSCN ist ortsgenau möglich, wenn entsprechende Eingangsdaten vorliegen. Alternativ kann mit potenziellen Drainageflächen auf der Basis der Bodeninformationen (z.B. Staunässe gefährdete Böden) wie z.B. in Sachsen-Anhalt (Pfützner et al., 2013) gearbeitet werden. Dieses Vorgehen ist aber mit großen Unsicherheiten behaftet und deshalb primär in makroskaligen Modellanwendungen zu empfehlen.

Die für das Untersuchungsgebiet vorliegenden Informationen zu Drainagesystemen sind einerseits nicht flächendeckend und andererseits sehr alt (Datenbasis, (1-20) Alte Drainagepläne). Bei sehr alten Drainageplänen ist jedoch oft zweifelhaft, ob das beschriebene Entwässerungssystem tatsächlich noch effektiv drainiert. Zum einen setzen sich die abflusswirksamen Elemente über die Jahre zu, zum anderen werden Drainagen durch Bodenbearbeitung mit schwerem Gerät beschädigt. Dies ist vermutlich auch in der Bergtheimer Mulde der Fall, wo 60 bis >100 Jahre alte Drainagen vorliegen. So bestätigten 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, dass die Einarbeitung von Drainagen über eine einfache Grabenentwässerung hinaus nicht sinnvoll ist. Die momentan im LWHM berücksichtigte Entwässerung wird daher lediglich im Grundwassermodell über Grabenentwässerung dargestellt.

6.2.6 Meteorologische Daten

Folgende meteorologische Attribute in täglicher Auflösung werden für die Simulation benötigt:

- Niederschlag [mm]
- Lufttemperatur (Minimum, Maximum, Mittelwert) [°C],
- Relative Luftfeuchtigkeit [%],
- Globalstrahlung [J/cm^2] oder die Sonnenscheindauer [h],
- Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s].

Als Basis für die Niederschlagsverteilung werden die Rasterprodukte des Deutschen Wetterdienstes DWD genutzt. Die REGNIE-Niederschlagsdaten sind für alle Bundesländer ab 1951 bis zum aktuellen Zeitpunkt als Tagessummen im $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Raster verfügbar (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/regnie.html>).

Die Regionalisierung der übrigen Witterungsattribute erfolgt aus bodengebundenen Stationswerten. Die Basis hierfür ist das meteorologische Messnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD), ergänzt um weitere meteorologische Stationen des Agrarmeteorologischen Dienstes Bayern (AMD). Die Daten des DWD und des AMD (Zeitreihen und ausführliche Stationsmetadaten) sind über Internetplattformen frei verfügbar und werden dort auch ständig aktualisiert bzw. – wenn erforderlich – korrigiert. Die Karte zur Lage der meteorologischen Stationen und die benötigten Zeitreihen wurden von diesen Plattformen heruntergeladen und entsprechend den Anforderungen des Modells aufbereitet (z.B. Berechnung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe aus der angegebenen Geschwindigkeit in der jeweiligen Messhöhe). Die Zeitreihen wurden einer Vollständigkeitsprüfung unterzogen und nach Grenzwertfehlern (Einhaltung eines plausiblen Wertebereiches) und Konsistenzfehlern (zeitliche Dynamik ist plausibel) untersucht. Außerdem erfolgt auch ein Vergleich der Zeitreihen benachbarter Stationen, um die räumliche Konsistenz bei Berücksichtigung der Topographie zu überprüfen. Eine Mengenkorrektur der gemessenen Niederschläge (z.B. nach Richter, 1995) erfolgte nicht.

Abbildung 32 zeigt die Lage der berücksichtigten Klimastationen und die Stützstellen des REGNIE-Niederschlagsrasters. Tabelle 11 fasst wichtige Merkmale der Stationen zusammen.

Nur wenige der im Bereich des Untersuchungsgebietes vorhandenen meteorologischen Stationen messen kontinuierlich alle benötigten Witterungsattribute über den gesamten Simulationszeitraum. Deshalb müssen unvollständige Reihen anhand der in der Nachbarschaft vorhandenen Zeitreihen gefüllt werden. Dazu wird das in ArcEGMO implementierte Verfahren bei Berücksichtigung der Topographie genutzt. ArcEGMO enthält als räumliches Interpolationsverfahren eine „Inverse Distance Interpolation“ (IDW) in Kombination mit einer Regressionanalyse zum Höhengradienten, das wahlweise mit einer beliebigen Anzahl benachbarter Stationen oder auf der Basis von Quadranten mit jeweils der nächstgelegenen Station pro Quadranten erfolgen kann (s. Pfützner, 2002: <http://www.doku.arcegmo.de/5-2-klimadaten/>). Die Art und Anzahl der einzubeziehenden benachbarten Stationen werden in Abhängigkeit von der Menge der verfügbaren meteorologischen Stationen und der topographischen Heterogenität des Modellgebietes festgelegt. Im Weiteren wurde mit den vier nächstgelegenen Stationen gearbeitet. Bei der Verteilung der Globalstrahlung und der Lufttemperatur werden außerdem Hangneigung und Hangausrichtung berücksichtigt. Mit diesem Verfahren konnte in den meisten Modellgebieten, in denen mit ArcEGMO gearbeitet wurde, eine gute Abbildung der realen räumlichen Verteilung der einzelnen Witterungsattribute erreicht werden.

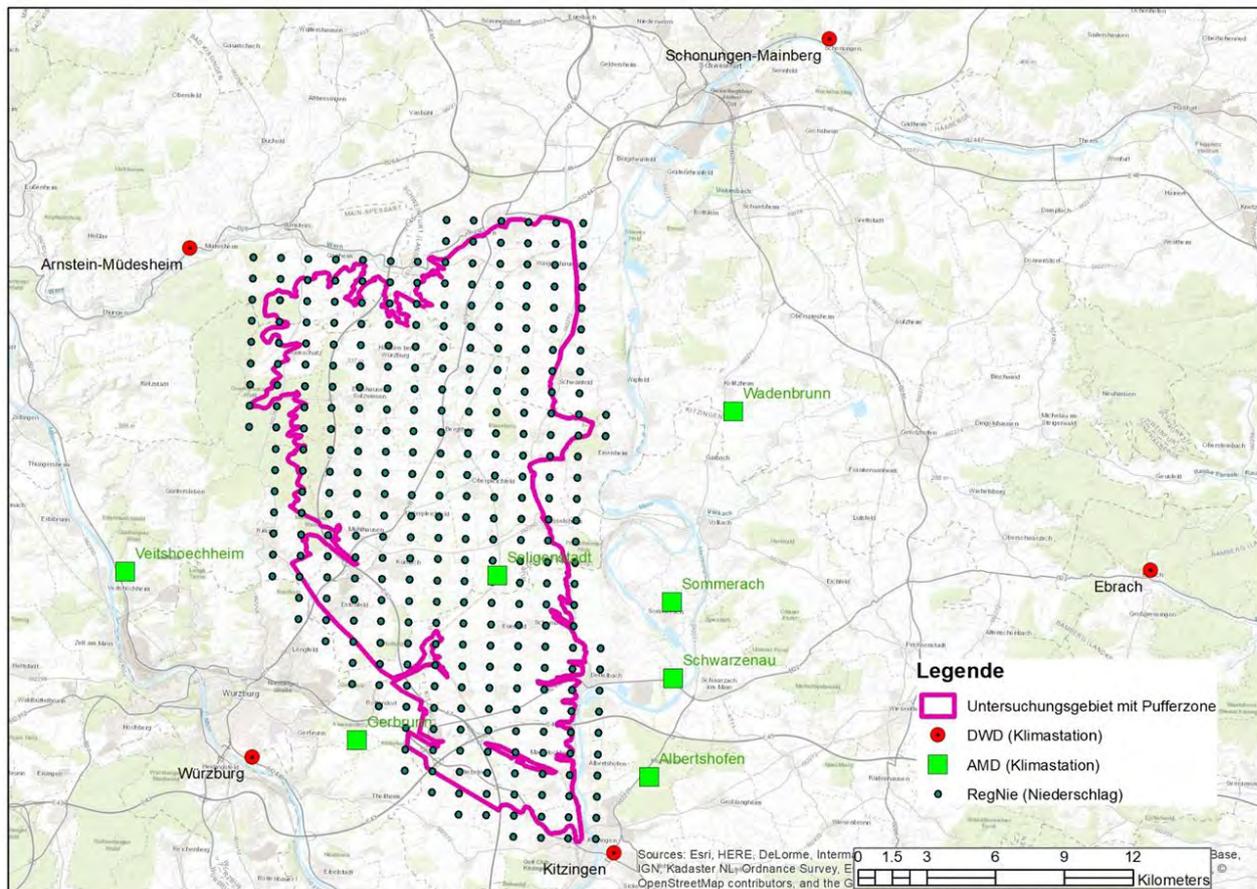


Abbildung 32: Lage der erfassten Klimastationen und REGNIE-Niederschlagsraster

Tabelle 11: Klimastationen (GB: geogr. Breite, GL: geogr. Länge)

Ort	Quelle	Messbeginn	Ende	Höhe [müNN]	GB	GL
Arnstein-Müdesheim	DWD	01.04.1986	-	220	49,9695	9,9113
Ebrach	DWD	01.01.1963	-	346	49,852	10,499
Kitzingen	DWD	01.11.1982	-	188	49,7363	10,1781
Würzburg	DWD	01.01.1947	-	268	49,7703	9,9577
Schonungen-Mainberg	DWD	01.03.2005	-	304	50,0579	10,2972
Seligenstadt	AMD	01.01.1989	-	281	49,5039	10,0612
Albertshofen	AMD	09.06.1989	-	205	49,4559	10,1154
Schwarzenau	AMD	12.03.1989	-	200	49,482	10,124
Iphofen	AMD	26.07.2007	-	350	49,4255	10,1627
Gerbrunn	AMD	15.04.2003	-	301	49,4642	10,0116
Veitshoechheim	AMD	25.09.1989	-	220	49,503	9,524
Sommerach	AMD	05.05.2007	-	210	49,5008	10,1234
Wadenbrunn	AMD	04.04.1991	-	235	49,544	10,1438

6.2.7 Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen

Für die Verarbeitung der im Gebiet aus dem Grundwasser geförderten Berechnungsmengen wird das Bewässerungsmodul von ArcEGMO genutzt, das in der Lage ist, mit unscharfen räumlichen Zuordnungen wie folgt zu arbeiten:

- Die Datenbasis wird um ein Brunnen-Cover erweitert, wobei jedem Brunnen oder jeder Brunnengruppe eine Zeitreihe mit Fördermengen (genehmigt, gemessen oder angenommen) zuzuordnen ist.
- Jede bewässerte Elementarfläche erhält eine Zuordnung zu dem Brunnen, aus dem sie Bewässerungswasser bezieht. Eine Zuordnung von mehreren Brunnen zu einer Elementarfläche ist nicht vorgesehen.
- Für die Aufteilung der Brunnenförderung auf die Flächen wird ein Schlüssel erarbeitet, der die Aufteilung gemäß der Bewässerungswürdigkeit der Fruchtarten vornimmt.
- Für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes erhalten die bewässerten Flächen neben dem Niederschlag die Bewässerung als zusätzliche Eingangsgröße.

Insgesamt werden im LWHM 111 Brauchwasserbrunnen berücksichtigt. Eine Zuordnung zu den bewässerten Flächen allein über Nachbarschaftsbeziehungen (wie im Angebot vorgeschlagen) ist auf Grund der räumlichen Verteilung der Brunnen und der daraus bewässerten Flächen nicht möglich (Abbildung 33). Zuerst musste eine Zuordnung der Brunnen und Flächen zu je einem Landwirtschaftsbetrieb erfolgen.

Als Basis für die Zuordnung der potenziell bewässerten Flächen zu einem Brunnen dienten folgende Eingangsdaten:

- Karte der Lage der 111 Brauchwasserbrunnen mit Zuordnung zum Betreiber (Name), einer Brunnengruppe und den genehmigten und tatsächlichen Entnahmemengen (Zuarbeit R&H Umwelt),
- „FF_Auswahl_YYYY.shp“: Shapefiles der Flurstücke der landwirtschaftlichen Betriebe (Betriebsnummer) mit nennenswerten Entnahmemengen für die Jahre 2005, 2007, 2010, 2013, 2015, 2017 und 2019 (KWS Saat nur 2020),
- Zuordnung der Betriebsnummer zum Namen des Betriebes.

Wie bei den InVeKoS-Daten wurde die Verarbeitung durch unterschiedliche Flächengrößen und Bewirtschafter in den einzelnen Jahren erschwert. Deshalb erfolgte zuerst eine Verschneidung aller Flurstück-Shapes. Die einzelnen Flächen wurden bereinigt und dem Landwirt mit der längsten Nutzungsdauer zugewiesen. Im Anschluss erfolgte die Zuordnung der Flächen eines Betriebes zu seinen Brunnengruppen. Da ArcEGMO ein Brunnen-Cover benötigt (s. oben, Pkt. a), wurde zur Verortung der Brunnengruppen der jeweils förderstärkste und - wenn möglich - auch bzgl. der Lage repräsentative Brunnen einer Gruppe ausgewählt und als räumliche Stützstelle für diese Brunnengruppe genutzt (Abbildung 33). Tabelle 12 enthält eine Übersicht aller im LWHM berücksichtigten Brunnengruppen mit Anzahl der dazugehörenden Brunnen und den zugeordneten Flächen.

Da nicht alle Fruchtfolgen bewässerungswürdige Fruchtarten enthalten, wurde ein neues, fruchtartenspezifisches Bewässerungsmodul für ArcEGMO entwickelt (s. Schulungsunterlagen ArcEGMO: Bewässerungsmodul). Dieses ermöglicht die Verteilung des aktuell zur Verfügung stehenden Berechnungswassers auf die angeschlossenen Flächen, auf denen zu diesem Zeitpunkt eine bewässerungswürdige Fruchtart (vgl. Kapitel 6.2.4) wächst. Die aufgebrachte Menge an Zusatzwasser (ZW) ist dabei vorerst unabhängig vom intern berechneten Bewässerungsbedarf. Dieser Bewässerungsansatz ist besonders genau, wenn die reale Fruchtartenfolge auf den Teilschlägen und die täglichen Fördermengen bekannt sind. Im BWHM Bergtheimer Mulde wird aufgrund der unsicheren Eingangsdatenlage zur Bewirtschaftung stattdessen mit Managementtypen, charakterisiert durch repräsentative Fruchtfolgen, gearbeitet. Demzufolge kann die angenommene Fruchtart sich völlig von der realen Frucht auf dem jeweiligen Teilschlag zu einem Zeitpunkt unterscheiden. Außerdem sind im besten Falle die monatlichen Förderraten der Brunnen bekannt, die gleichmäßig über den Monat aufgeteilt werden.



Abbildung 33: Brauchwasserbrunnen (Sterne), Brunnengruppen (Kreise) und aggregierte Flurstücke mit Zuordnung zu einer Brunnengruppe (eine Farbe pro Brunnengruppe, Brunnengruppe in Grün) bei Unterpleichfeld

Um trotzdem eine realistische Bewässerung zu simulieren, müssen im Datenmodell folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Fördermenge und zu bewässernde Flächen müssen in vernünftigem Verhältnis stehen (s. Tabelle 12),
- bewässerte Fruchtfolgen und Flächencluster innerhalb einer Fruchtfolge müssen möglichst gleichverteilt sein und eine ausreichende Zellenanzahl aufweisen.

Trotzdem kann es besonders zu Beginn und am Ende der Vegetationsperiode vorkommen, dass nur noch einzelne Flächen zur Bewässerung zur Verfügung stehen. Deshalb wird intern die Bewässerungsgabe auf 20 mm/m² und Tag begrenzt.

In Tabelle 12 sind die in das Modell eingehenden Fördermengen der Brunnengruppen, die zugeordneten Bewässerungsflächen und die sich ergebenden Bewässerungsmengen als mittlere Jahressummen für den Zeitraum 2010-2019 dargestellt. Ab 2010 liegen für die meisten Brunnen belastbare Daten vor. Durch die Begrenzung der Beregnung auf die Vegetationszeit in Kombination mit der angenommenen Gleichverteilung der Monatssummen auf Tageswerte werden 11,4 % des geförderten Wassers im Modell nicht verrechnet. Dieser Wert erscheint hinsichtlich der Unsicherheiten der Datenbasis als akzeptabel.

Setzt man alle einer Brunnengruppe zugeordneten Flächen zur erfassten Fördermenge in Beziehung, so ergeben sich mittlere jährliche Bewässerungsmengen (ZW) im Bereich 8 - 634 m³/ha (Tabelle 12). Bei hohen Förderraten und vergleichsweise wenigen zugeordneten GOW-Flächen ergeben sich überdurchschnittlich hohe Bewässerungsraten (z.B. BG 6 und 18/19) auf diesen Flächen. Eventuell muss hier noch eine weitere Präzisierung der Flächennutzung erfolgen.

Tabelle 12: Brunnengruppen BG mit Anzahl n der Brunnen, Gesamtfördermenge (ohne Brauchwasser), Fördermenge März-Oktober, erfasste Bewässerungsmenge und zugeordneten Flächen, Bewässerungsmengen (ZW) als Mittelwerte 2010-2019

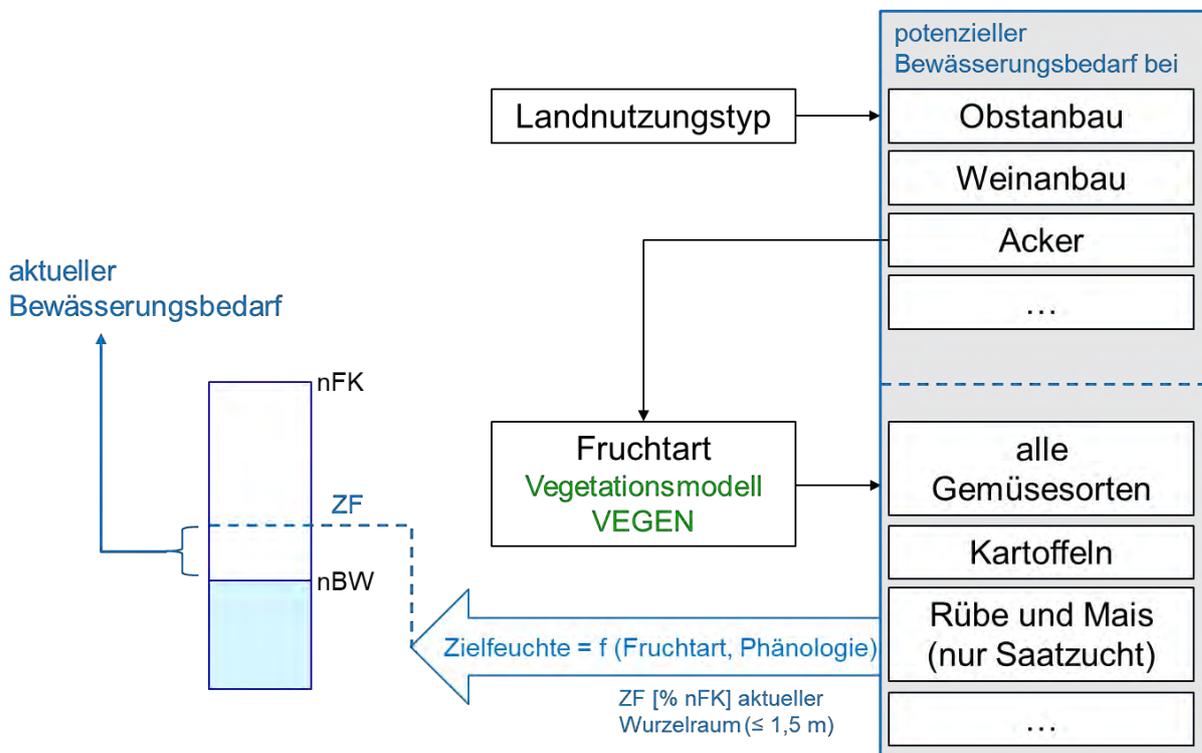
BG	n	Förderung [m³/a]	Förderung [m³/a] März-Oktober	Bewässerung [m³/a] Simulation	zugeordnete Fläche [ha]	davon Gemüse, Obst, Wein (GOW) [ha]	GOW-Flächen > 1 km Entfernung	ZW [m³/ha a]
1	3	1 972	1 922	1 161	69,8	69,8		28
2	12	70 751	69 906	58 219	715,5	464,0	3,75	151
3	1	0	0	0	0,0	0,0		
4	4	11 411	11 406	10 434	68,0	59,8		191
5	4	905	905	711	42,3	7,3		125
6	3	28 349	28 349	22 702	92,0	62,3		455
7	16	77 763	77 763	69 906	418,0	243,3	8,75	320
8	8	22 034	21 979	21 748	95,3	55,5		396
9	1	245	245	244	8,0	6,8		36
10	1	1 144	1 141	1 136	16,5	16,3		70
11	7	13 092	13 066	11 813	191,8	101,0		129
12	4	44 013	43 926	39 730	302,3	170,0		258
13	1	0	0	0	118,8	6,3		
14	4	562	561	558	108,3	19,8		28
15	2	3 359	3 352	2 893	46,8	16,5	4,25	203
16	1	0	0	0	23,5	15,8		0
17	1	3 084	3 076	2 851	83,5	24,5		126
18 19	6	21 594	21 224	19 925	107,3	33,5	2,5	634
20	1	1 059	1 059	807	40,5	8,0		132
21	6	5 022	5 021	4 830	45,8	39,5	3,3	127
23*	1	0	0	0	111,8	3,8		
24*	1	0	0	0	0,0	0,0		
25	1	0	0	0	41,5	23,0		
26	1	0	0	0	33,5	25,8		
28	9	11 994	11 970	10 954	575,0	129,8		92
30	1	0	0	0	124,0	0,0		
31	1	0	0	0	104,3	27,8		
32*	1	0	0	0	0,0	0,0		
33	2	49	45	0	5,5	5,5		8
34	7	12 321	12 299	10 346	37,5	37,5		328
Σ		330 722	329 211	290 968	3 627	2 102		
keine Zuordnung möglich						429,0		

* Brauchwasser für Tierzucht

Dazu kommen noch 429 ha GOW, die keinem Landwirt und somit auch keinem Bewässerungsbrunnen zugeordnet werden konnten. Ein Großteil dieser Flächen sind die Weinberge am südöstlichen Rand des UG in Mainstockheim. Einige der als potenzielle Bewässerungsflächen (s. Kap. 6.2.4) charakterisierten Feldstücke liegen so weit von allen erfassten Brunnen (Spalte „GOW-Flächen > 1 km Entfernung“ in Tabelle 12) entfernt, dass sie vorerst als nicht bewässert modelliert werden. Diese insgesamt 459 ha werden im Modell nicht bewässert.

Die Brunnengruppe 34 liegt schon im nördlichen Unsicherheitsgebiet, für das keine InVeKoS-Daten vorliegen und somit alle Ackerflächen mit dem Managementtyp 2 (Getreide) belegt wurden. In Abstimmung mit dem Betreiber der Brunnengruppe 34 wurden dessen Flächen in diesem Areal als MTyp 5 (Tabelle 8) und der Fruchtfolge 5 (Tabelle 9) charakterisiert.

Das Modell ArcEGMO bietet die Möglichkeit, den aktuellen Bewässerungsbedarf der angebauten Kulturen zu berechnen. Grundlage hierfür sind der verfügbare Bodenwassergehalt in der Wurzelzone sowie die Phänologie und die pflanzenspezifischen Bedürfnisse der einzelnen Kulturarten für ein optimales Wachstum (Abbildung 34).



Bezug: pflanzenverfügbares Bodenwasser (nBW)

Abbildung 34: Modellkonzept zur Berechnung des aktuellen Bewässerungsbedarfs

In Abbildung 35 sind die so berechneten Bedarfsmengen den tatsächlichen Fördermengen und den daraus abgeleiteten Bewässerungsmengen als Summe über das gesamte Untersuchungsgebiet (Brunnen) gegenübergestellt. Allgemein ist dieser Bedarf etwa dreimal so hoch wie die realisierte Bewässerung, die weiteren Restriktionen unterliegt. In den extremen Trockenjahre 2015 und 2018 (vgl. Kap. 6.4.2, Tabelle 13) kann so nur ein Bruchteil des Bewässerungsbedarfs befriedigt werden.

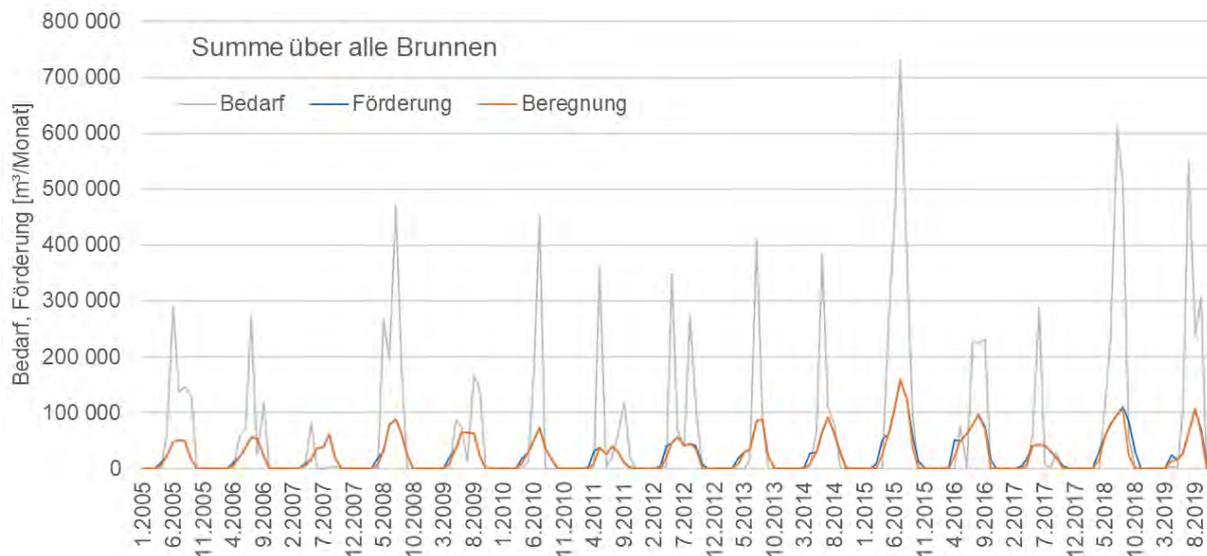


Abbildung 35: Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über alle Brunnen

In Abbildung 35 ist auch gut die Abweichung der im Modell umgesetzten Bewässerungsmenge von der Fördermenge im April und Oktober zu erkennen. Deutlicher wird das in den folgenden, exemplarischen Abbildungen für zwei Brunnengruppen (Abbildung 36, Abbildung 37). Hier zeigen sich auch die z.T. von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlichen Fördermengen. Obwohl versucht wurde, Brauchwasser herauszurechnen (s. Kap. 5.8.2), scheinen Teile der geförderten Mengen (insbesondere im März/April und Oktober) nicht für die Flächenbewässerung genutzt zu werden.

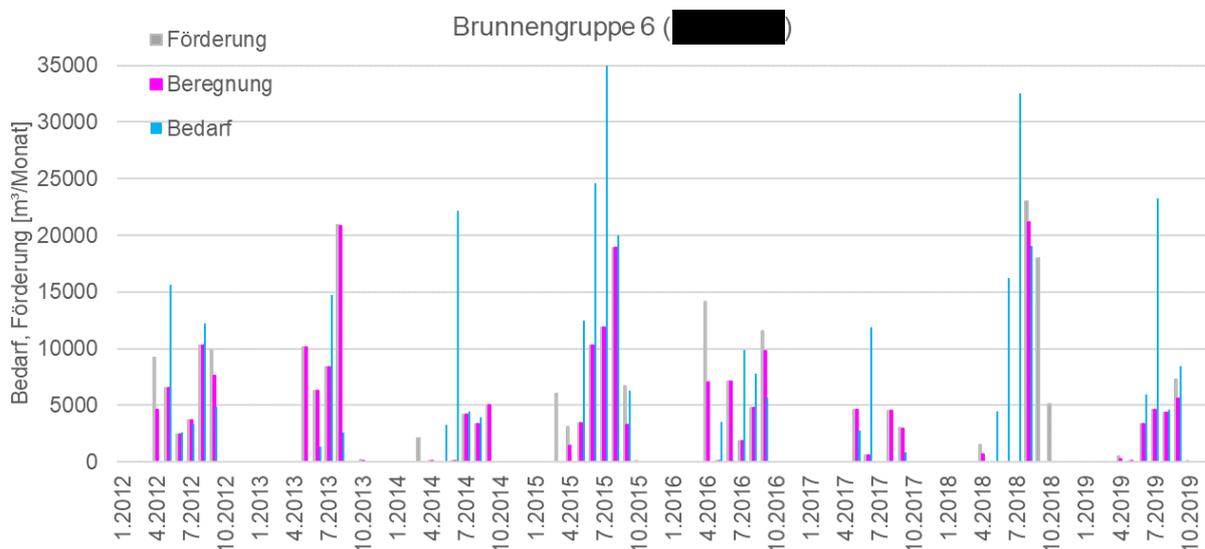


Abbildung 36: Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über die Brunnen der Brunnengruppe 6

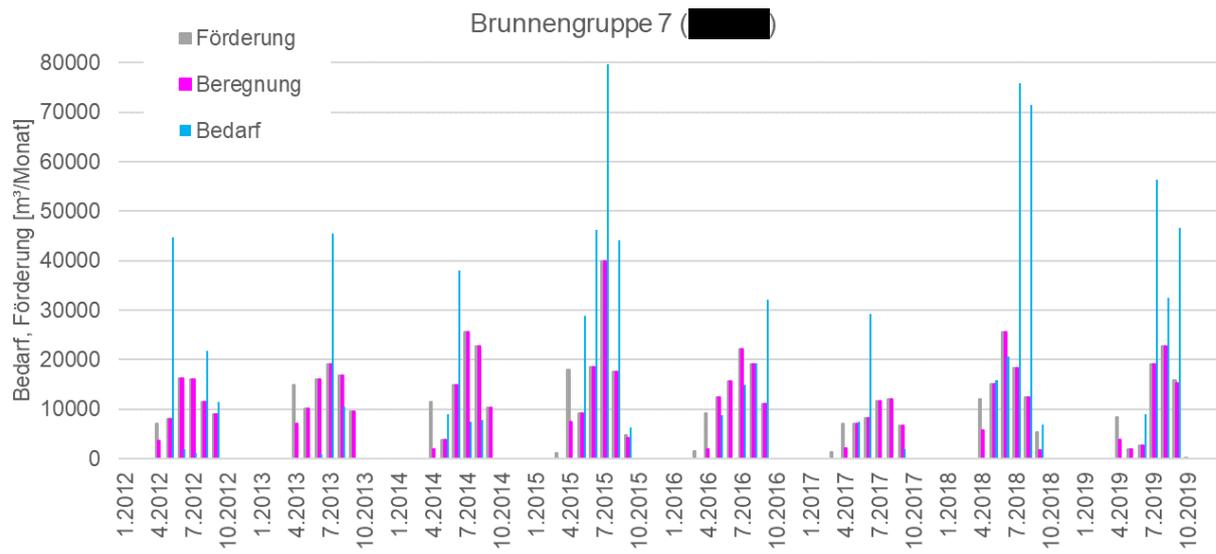


Abbildung 37: Fördermengen, realisierte Bewässerung und simulierter Bewässerungsbedarf als Summe über die Brunnen der Brunnengruppe 7

6.3 Aufbau und Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodelles

Das eigentliche Bodenwassermodell besteht aus der Kombination des im vorigen Arbeitsschritt erstellten GIS-Modells und der Simulationssoftware ArcEGMO (Kap. 6.1). Als Simulationszeitraum für die Abbildung des Ist-Zustandes wurde die Periode 01.01.2005 bis 31.12.2019 festgelegt. Zum Einschwingen rechnet das BWHM mit einem einjährigen Vorlauf, also ab dem 01.01.2004.

Der erste Funktionstest erfolgte mit deaktiviertem Bewässerungsmodul. Außerdem wurde die Vegetationsdynamik mit einem vereinfachten Modellansatz auf der Basis mittlerer Entwicklungsverläufe einzelner Vegetationstypen beschrieben. Alle ackerbaulich genutzten Flächen wurden dafür dem Managementtyp 2 (Getreide-dominierte Fruchtfolge) zugeordnet.

Eine Kalibrierung des Modells ist nur für die konzeptionellen Modellteile (laterale Abflusskonzentration) erforderlich. Dazu werden langjährige, belastbare Durchflussmessungen an Gewässern im Untersuchungsgebiet benötigt. Da es im Untersuchungsgebiet keine Durchflussmessungen im Untersuchungszeitraum gibt, und der Schwerpunkt der BWH-Modellierung auf der Simulation von Verdunstung und Sickerwasserbildung als obere Randbedingung für das GWM liegt, wurde auf eine Kalibrierung dieser Modellteile verzichtet.

Bodenparameter und allgemeine Landnutzungsparameter werden bei Nutzung von ArcEGMO nicht kalibriert. Allein bei Lössböden zeigten die bisherigen Modellanwendungen, dass die in der KA5 (AG Bodenkunde, 2005) angegebenen kf-Werte die reale Leitfähigkeit unterschätzen. Gute Erfahrungen wurden hierfür mit einer Erhöhung um 20-30% gemacht (Klöcking et al., 2018). Ein erster Modelllauf mit den Originalkf-Werten der KA5 (AG Bodenkunde, 2005) erbrachte insgesamt recht hohe Anteile an Oberflächenabflüsse bedingt durch Sättigung der oberen Bodenschichten. Da die dadurch bewirkten Abflussspitzen an den drei untersuchten Oberflächengewässern deutlich über den in Würzburg an der Pleichach gemessenen lagen, wurden die kf-Originalwerte um 30 % erhöht. Das führte zu einer Erhöhung der Sickerwasserraten von 58 mm/a auf 73 mm/a im Gebietsmittel 2005-2019 bei gleichzeitiger Reduzierung der Oberflächenabflüsse um ca. 40 % (s. Zwischenbericht 12/2020).

Nach diesem ersten Modelltest erfolgte die Implementierung des Bewässerungsregimes (Kap. 6.2.7) und die detaillierte Simulation des Vegetationsdynamik auf der Grundlage repräsentativer Fruchtfolgen (Kap. 6.2.4). Die im Wachstumsmodell enthaltenen fruchtartspezifischen erforderlichen Wärmemengen bis zur Reife wurden für das Untersuchungsgebiet angepasst. Die Basis dafür bildeten die von einzelnen Landwirten bereitgestellten mittleren Saat- und Erntetermine der berücksichtigten Kulturarten (s. Kap. 6.2.4).

Gleichzeitig erfolgte eine nochmalige Überprüfung der Bodendatenbasis und daraufhin die Korrektur der fehlerhaften Parameter der Leitbodenprofile 3544 und 3552 der ÜBK25. Die ersten Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells in Kopplung mit dem BWHM erbrachten lokal eine zu geringe Dynamik des Grundwasserstandes. Deshalb wurde die Bodenparametrisierung noch einmal angepasst. Die im ersten Modelltest vorgenommene generelle Erhöhung der gesättigten Leitfähigkeit um 30% wurde wieder zurückgenommen. Stattdessen erfolgte eine körnungsspezifische Anpassung für einzelne Bodenschichten mit sehr geringen kf-Werten laut KA5 (Verdopplung, wenn Sandgehalt < 20 % und $k_f < 14$ mm/h) bei gleichzeitiger Berücksichtigung eines vegetationsbedingten Makroporenflusses im Oberboden und einer Quellsfähigkeit von Böden mit einem Tongehalt von über 50 % um 5% (Erhöhung der temporären Wasseraufnahmekapazität). Hintergrund für die Erhöhung der Leitfähigkeit in diesen stark bindigen Horizonten ist deren gute Durchwurzelbarkeit und das beobachtete lange Vorhandensein von vegetationsbedingten Makroporen (alte Wurzelkanäle bis in 2 m Tiefe). Der wichtigste Effekt war die Verringerung der Oberflächenabflüsse und der hypodermischen Abflüsse zugunsten der Sickerwasserbildung. Der wiederholte Funktionstest des Modells (Kap. 6.4.2) erbrachte plausible Ergebnisse.

6.4 Test des ungekoppelten Bodenwasserhaushaltsmodells

6.4.1 Abbildung der klimatischen Situation

Im Vordergrund der Modellvalidierung des BWHM steht die vertrauenswürdige Abbildung des natürlichen Wasserdargebots und seiner künftigen Entwicklung mit dem Fokus auf das Niedrigwasserabflussgeschehen. Dazu ist die Erfassung der meteorologischen Bedingungen eine Grundvoraussetzung. Abbildung 38 zeigt die räumliche Verteilung der Niederschläge und Lufttemperaturen im Mittel 2005-2019.

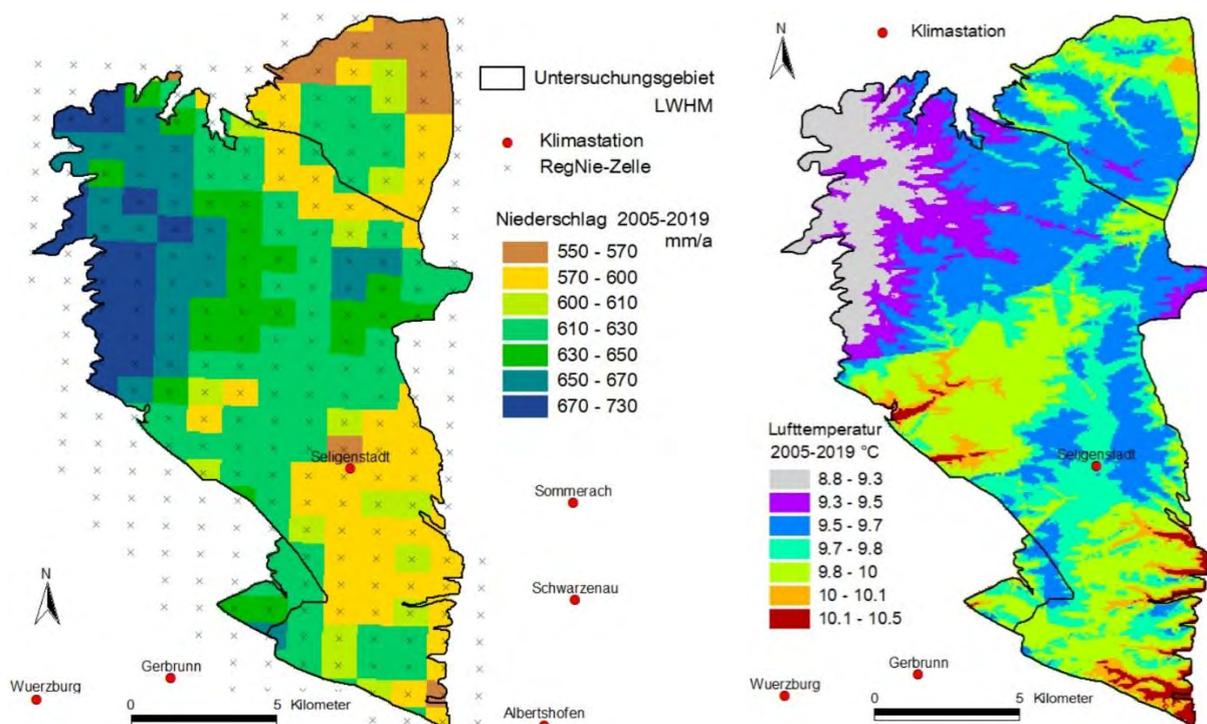


Abbildung 38: Niederschlag [mm/a] und Lufttemperatur im Mittel 2005-2019

Die mittleren Gebietsniederschläge liegen bei 626 mm/a, wobei eine leichte, aber nicht signifikante Abnahme im Simulationszeitraum 2005-2019 zu verzeichnen ist. Die Grasreferenzverdunstung GRV (ATV-DVWK, 2002) liegt mit 636 mm/a über dem Niederschlagsdargebot. Das Gebiet weist somit eine negative klimatische Wasserbilanz auf. Außerdem ist wie bei den Lufttemperaturen (9,7 °C im Gebietsmittel) ein deutlicher positiver Trend der GRV seit 2005 festzustellen (Abbildung 44 und Tabelle 13).

Auffällig ist der besonders trockene Bereich um Seligenstadt. Es wurden deshalb für die RegNie-Zelle RN 384576, in der die AMD-Station Seligenstadt liegt, die Niederschläge beider Quellen miteinander verglichen. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1.1.2004-31.12.2019 (Abbildung 39) zeigen, dass bei der Generierung des Niederschlagsrasters des DWD die Messdaten der AMD-Stationen scheinbar nicht berücksichtigt werden. Auch wenn durch Nutzung beider Datenquellen im BWHM die Unterschiede etwas gemildert werden, muss in diesem Bereich mit einer Unterschätzung der Niederschläge um ca. 50 mm/a gerechnet werden. Wie Abbildung 38 verdeutlicht, scheint diese Unsicherheit aber lokal begrenzte (1-4 km²) zu sein.

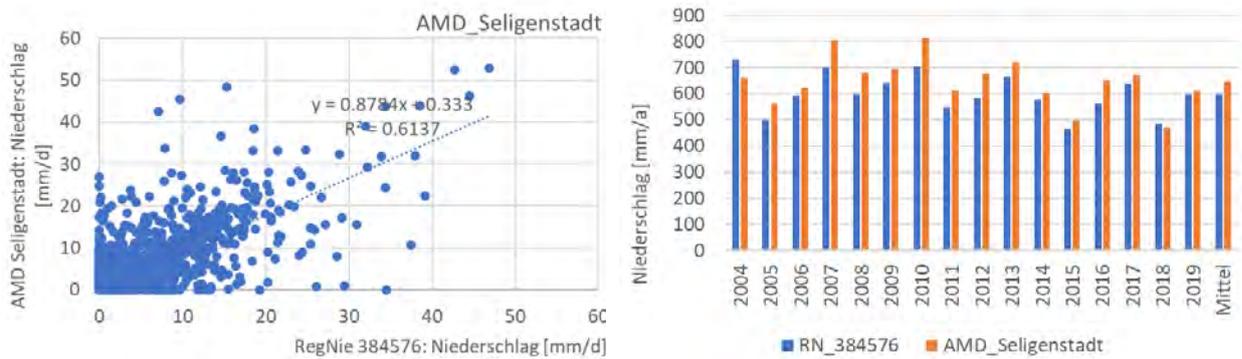


Abbildung 39: Vergleich der Niederlage der RegNie-Zelle RN 384576 mit den Messwerten der AMD Seligenstadt

Wie aus Abbildung 44 und den in Tabelle 13 aufgelisteten Jahreswerten der wichtigsten meteorologischen Größen und Wasserhaushaltsgrößen deutlich wird, nehmen im Untersuchungszeitraum die Niederschläge ab, währenddessen Lufttemperaturen und Grasreferenzverdunstung ansteigen. Besonders deutlich wird das bei der klimatischen Wasserbilanz (KWB) als Differenz aus Niederschlag und GRV. Hier kommt es seit 2011 zu einer deutlichen Verringerung mit stark negativen Werten in den beiden Trockenjahren 2015 und 2018. Zur Veranschaulichung dieser Entwicklung wurde der Untersuchungszeitraum in zwei zehnjährige, sich überlappende Perioden (2005-2014, 2010-2019) unterteilt, und diese miteinander verglichen (Abbildung 40, Abbildung 41).

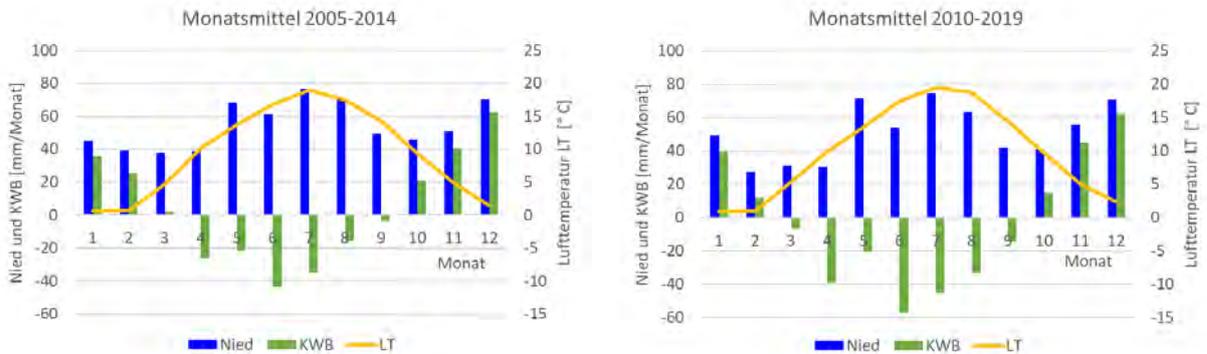


Abbildung 40: Lufttemperatur, Niederschläge und KWB als Monatsmittel in den beiden Perioden

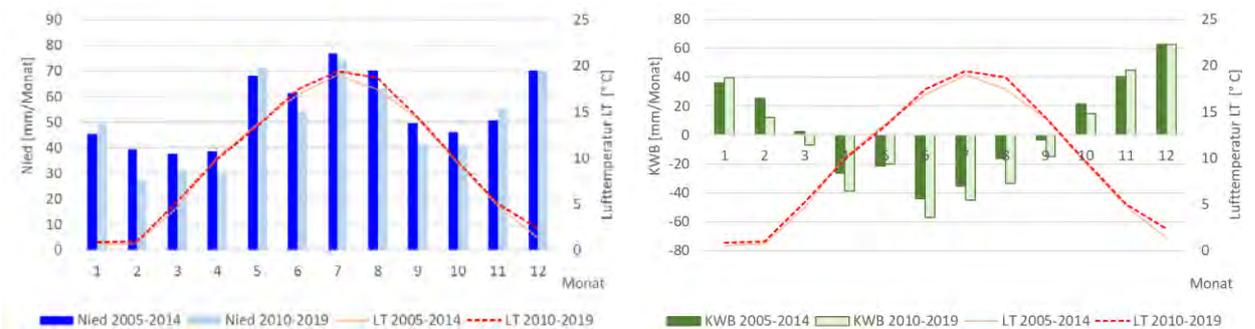


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Lufttemperaturen, Niederschläge und KWB als Monatsmittel in den beiden Perioden

Betrachtet man die räumliche Verteilung der KWB (Abbildung 42), so ergibt sich eine dramatische Verschlechterung in der zweiten Periode. Die Mehrzahl der Flächen weisen nun eine negative KWB auf.

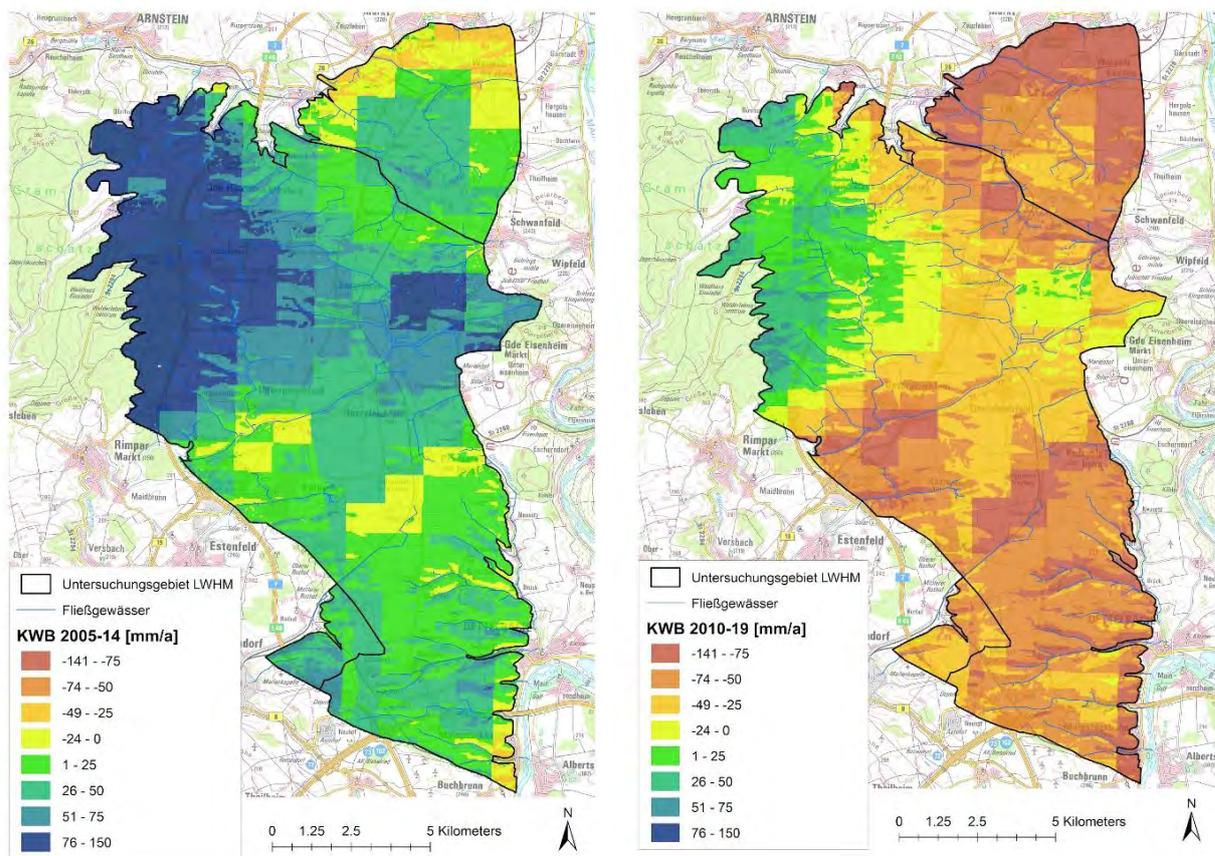


Abbildung 42: Klimatische Wasserbilanz (KWB), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)

6.4.2 Ergebnisse der Boden-Wasserhaushaltssimulation

Nach der Modellerweiterung erfolgte eine wiederholte Überprüfung folgender Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten hinsichtlich ihrer Größenordnung im Gebietsmittel und der räumlichen Ausprägung:

- Potenzielle Verdunstung (FAO-Grasreferenzverdunstung GRV und vegetationskorrigierte potenzielle Verdunstung EP),
- Reale Verdunstung ER,
- Oberflächenabfluss RO und Trennkanalisationsabfluss TKR von Siedlungen und Straßen,
- Interflow RH (Hypodermischer Abfluss) und
- Grundwasserneubildung GWN als Sickerwasser in 2 m Bodentiefe.

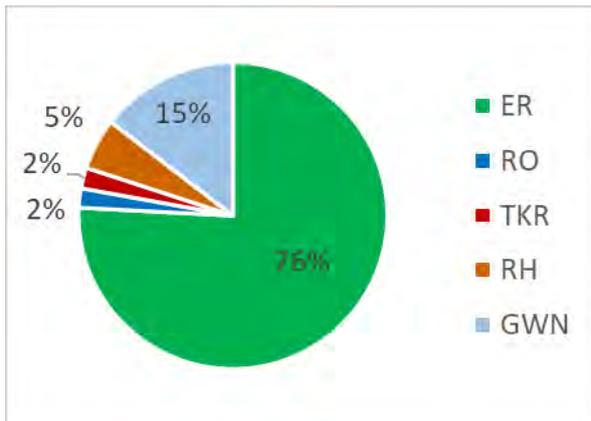


Abbildung 43: Aufteilung der WH-Komponenten (Anteil am Nied.)

Mit 1,3 mm/a hat die Bewässerung im Gebietsmittel nur einen geringen Anteil am Wasserhaushalt (Tabelle 13). Sie bewirkt jedoch eine Nivellierung der Verdunstung, die mit 76 % den größten Anteil am Wasserhaushalt im Mittel über Simulationsgebiet und -zeitraum einnimmt (Abbildung 43, Abbildung 44). Trotz steigenden Bedarfs durch die Klimaerwärmung bleiben die Verdunstungsmengen über den gesamten Simulationszeitraum nahezu gleich, limitiert durch den Bodenwasservorrat. Demgegenüber kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Grundwasserneubildung im Simulationszeitraum. Die Dynamik der relevanten Abflusskomponenten ist in Abbildung 45 dargestellt.

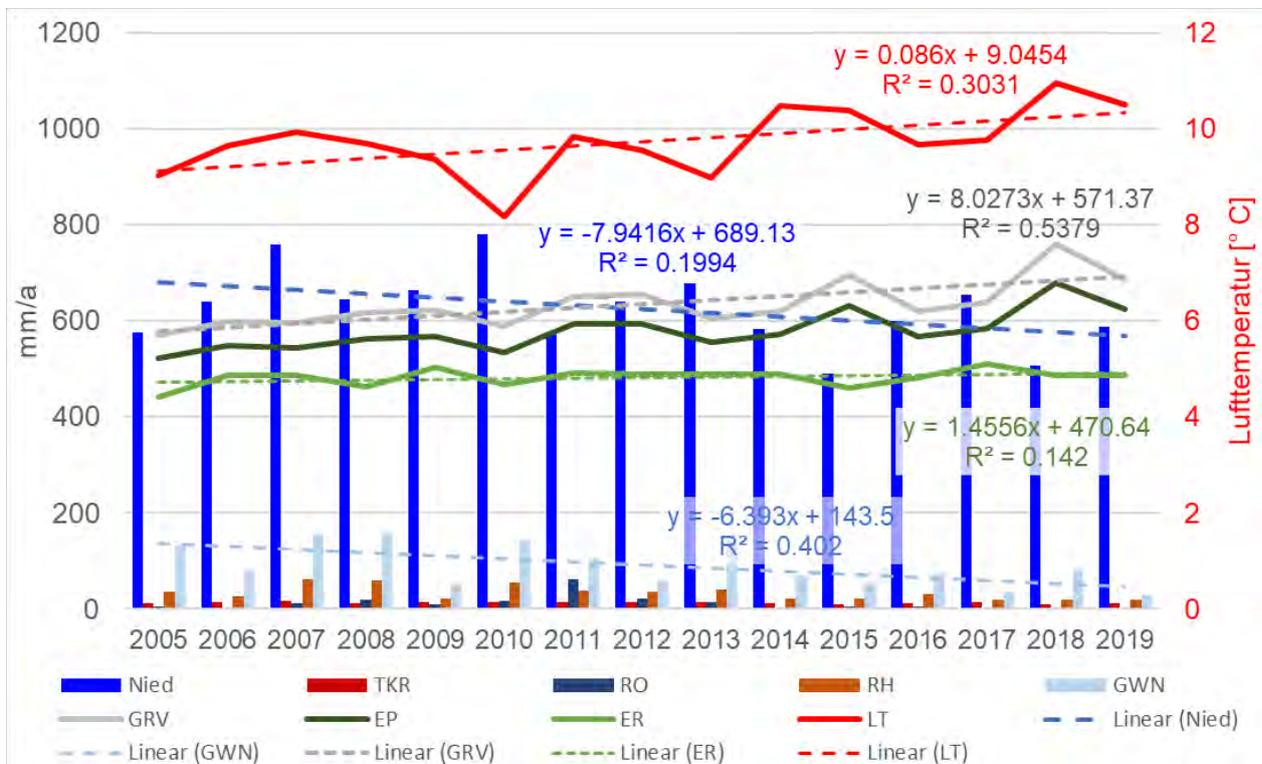


Abbildung 44: Lufttemperatur, Niederschläge und WH-Komponenten als Jahressummen im Gebietsmittel [mm/a], GRV: Grasreferenzverdunstung, EP: potenzielle Verdunstung, ER: reale Verdunstung, RO: Oberflächenabfluss, TKR: Trennkanalisationsabfluss, GWN: Sickerwasser in 2 m Tiefe

Tabelle 13: Lufttemperatur LT [°C] und Wasserhaushaltskomponenten als Jahressummen im Gebietsmittel [mm/a], ZW: Zusatzwasser, GRV: Grasreferenzverdunstung, KWB: Klimatische Wasserbilanz, EP: potenzielle Verdunstung, ER: reale Verdunstung, RO: Oberflächenabfluss, TKR: Trennkanalisationsabfluss, GWN: Sickerwasser in 2 m Tiefe und AnFK [%]: mittlere Bodenfeuchte bis 150 cm Tiefe als Anteil an der nutzbaren Feldkapazität, blau markiert: Nassjahre, rot markiert: Trockenjahre

Jahr	LT	Nied	ZW	GRV	KWB	EP	ER	RO	TKR	RH	GWN	AnFK
2005	9,0	575	0,9	571	5	522	442	6	12	36	132	86
2006	9,6	640	0,9	599	41	550	488	4	15	27	83	90
2007	9,9	759	0,8	597	162	545	486	13	18	62	159	103
2008	9,7	646	1,4	617	29	563	464	19	14	61	159	82
2009	9,4	665	1,2	622	42	569	504	9	15	23	53	84
2010	8,2	780	1,0	589	191	535	467	18	16	55	145	99
2011	9,8	576	0,7	651	-75	595	491	63	15	39	106	82
2012	9,5	641	1,1	656	-15	593	488	22	14	36	60	79
2013	9,0	679	1,3	606	73	557	489	15	16	42	145	95
2014	10,5	584	1,3	621	-37	573	490	2	12	22	69	82
2015	10,4	490	2,4	696	-206	632	461	5	11	22	54	70
2016	9,7	599	1,8	621	-22	567	481	5	13	31	73	83
2017	9,8	655	0,9	640	14	584	510	4	15	20	36	85
2018	11,0	508	1,8	761	-253	680	486	3	11	20	82	69
2019	10,5	587	1,4	686	-98	626	486	4	13	19	29	71
Mittel	9,7	626	1,3	636	-10	579	482	13	14	34	92	84

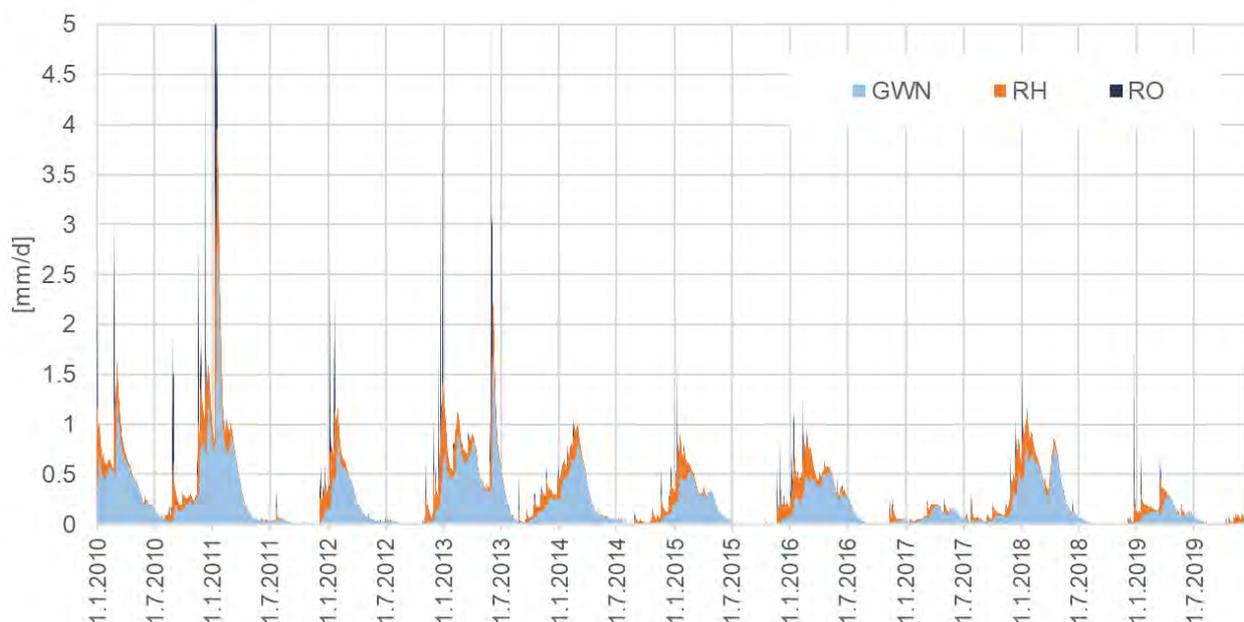


Abbildung 45: Tägliche Dynamik der simulierten Abflusskomponenten Sickerwasser in 2 m Tiefe (GWN), Oberflächenabfluss (RO) und hypodermischer Abfluss (RH) für das Gesamtgebiet

Wie aus Abbildung 44 und den in Tabelle 13 aufgelisteten Jahreswerten der wichtigsten meteorologischen Größen und Wasserhaushaltsgrößen deutlich wird, nehmen im Untersuchungszeitraum die Niederschläge ab, währenddessen Lufttemperaturen und Grasreferenzverdunstung ansteigen. Besonders deutlich wird

das bei der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) als Differenz aus Niederschlag und GRV. Hier kommt es seit 2011 zu einer deutlichen Verringerung mit stark negativen Werten in den beiden Trockenjahren 2015 und 2018. Das führt zu einer Abnahme der Bodenfeuchte, der hypodermischen Abflüsse und der Sickerwassermengen in 2 m Bodentiefe (GWN).

Zur Veranschaulichung dieser Entwicklung wurde der Untersuchungszeitraum in zwei zehnjährige, sich überlappende Perioden (2005-2014, 2010-2019) unterteilt, und diese miteinander verglichen. In der ersten Periode 2005-2014 werden größeren Sickerwassermengen, die zur Grundwasserneubildung beitragen, besonders zwischen Januar und April - mit Schwerpunkt im März - gebildet. In der zweiten Periode verringern sich diese Mengen drastisch. Besonders auffällig ist die deutliche Abnahme der Sickerwassermengen zwischen Februar und Mai. Generell liegen der nutzbare Bodenwasservorrat und auch die Sickerwassermenge in der Periode 2010-2019 unter denen der ersten Periode (Abbildung 46).

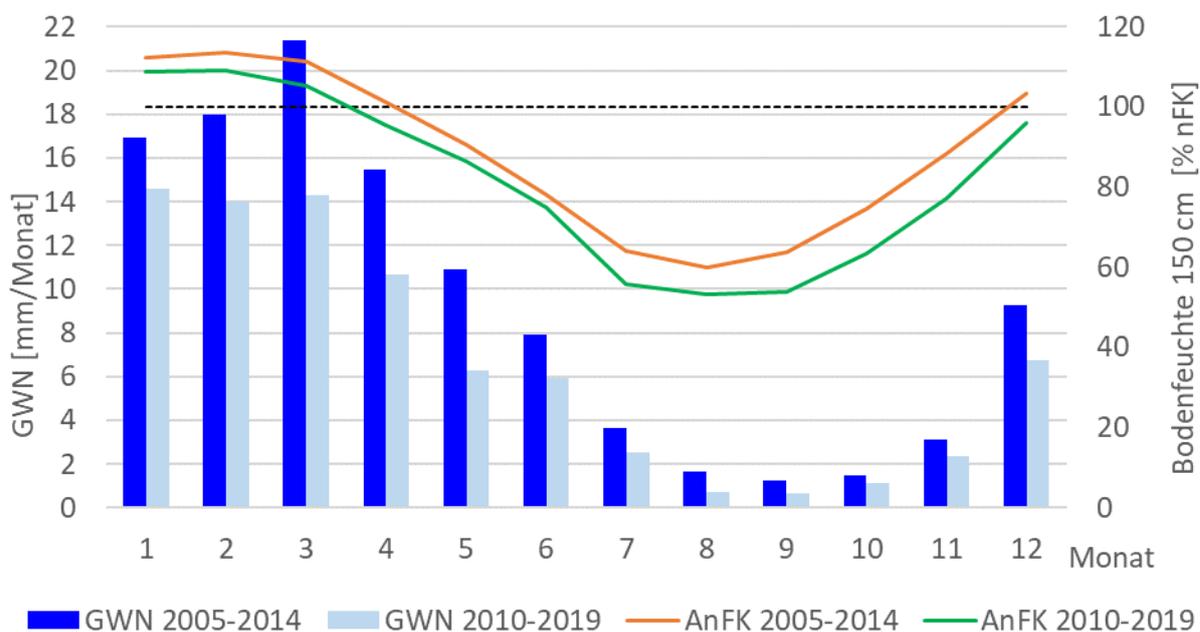


Abbildung 46: Gegenüberstellung der GWN und der Bodenfeuchte als Monatsmittel in den beiden Perioden

In Abbildung 47 ist die räumliche Verteilung der Bewässerungsmengen dargestellt. Auf der Mehrzahl der bewässerten Schläge wird in der Periode 2010-2019 deutlich mehr bewässert als in der ersten Periode.

Die Verteilung der realen Verdunstung (Abbildung 48) zeigt hohe Verdunstungsmengen auf grundwasser-nahen Arealen und Waldflächen und geringere Werte auf teilversiegelte Flächen gekoppelt mit den hier simulierten hohen Kanalisations- und Sättigungsabflüssen (Abbildung 49, links). Entsprechend der angebauten Fruchtfolgen und der zusätzlichen Bewässerung sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Ackerflächen sowohl räumlich als auch zeitlich (Periode 1 vs. 2) deutlicher.

Aufgrund der stark bindigen Böden und teilweise hohen Hangneigungen ist mit hohen oberflächennahen Abflüssen (RO, RH) über schlecht durchlässigen Bodenschichten zu rechnen (Abbildung 49). Diese werden besonders in Bereichen mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit des unteren Bodenhorizonts (vgl. Abbildung 31 rechts) simuliert. Besonders bei den Oberflächenabflüssen erscheint die räumliche Verteilung plausibel und deckt sich mit den Beobachtungen der Landwirte².

² Persönliches Gespräch mit M. Schereth

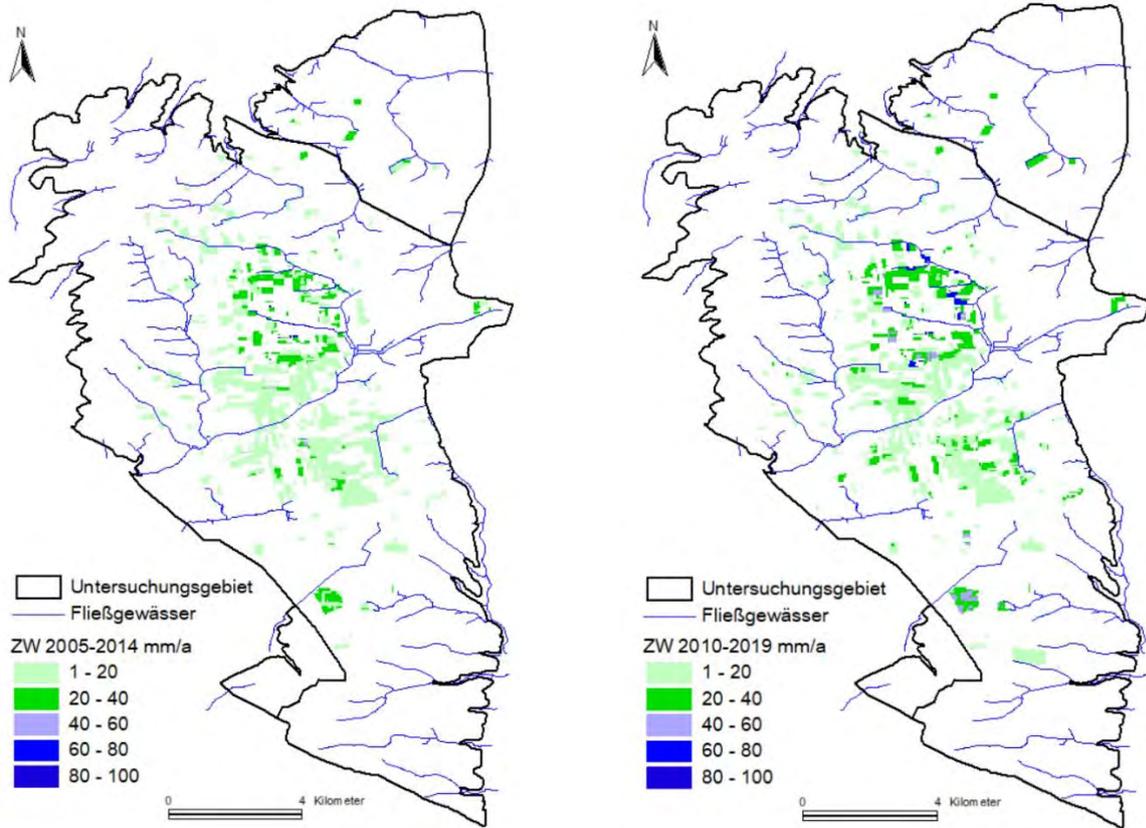


Abbildung 47: Simulierte Beregnungsmenge (ZW), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)

Insgesamt wird eine deutliche Abnahme der Sickerwasserraten in 2 m Bodentiefe (GWN) über den Simulationszeitraum berechnet (Abbildung 44, Tabelle 13). Wie die Gegenüberstellung der mittleren Raten für die beiden Perioden 2005-2014 und 2010-2019 in Abbildung 50 verdeutlicht, sind davon besonders der nordöstliche Gebietsteil und die Gegend südlich von Seligenstadt (Einzugsgebiet des Schernauer Baches) betroffen. In diesen Bereichen wird auch eine deutliche Abnahme der nutzbaren Bodenwasservorräte simuliert (Abbildung 51).

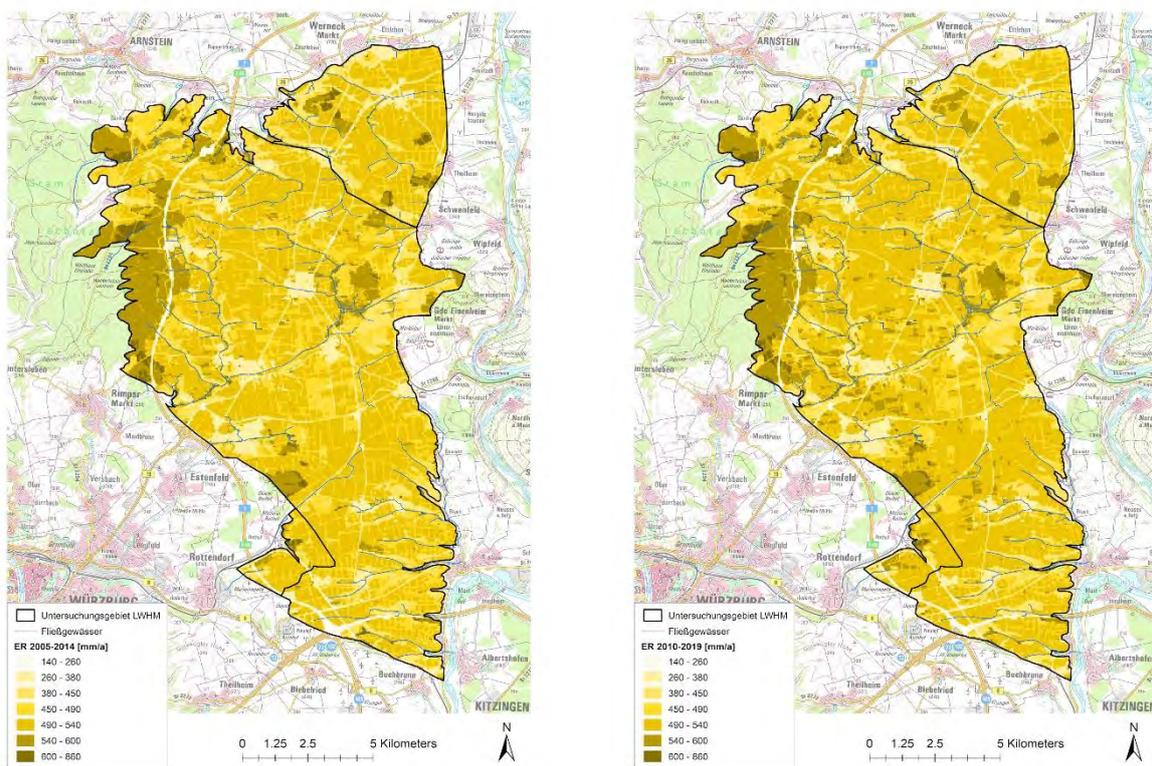


Abbildung 48: Jährliche Verdunstung (ER), 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)

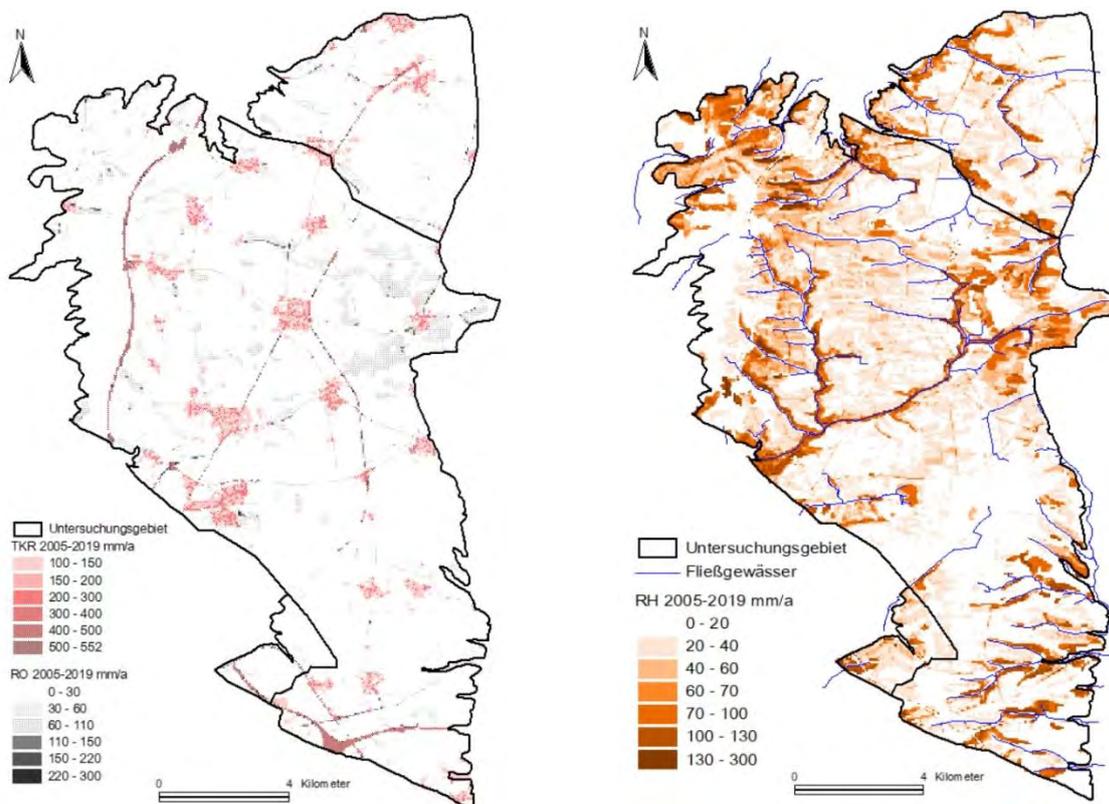


Abbildung 49: Simulierte Oberflächenabflüsse (RO, TKR) und Interflow (RH) im Mittel 2005-2019

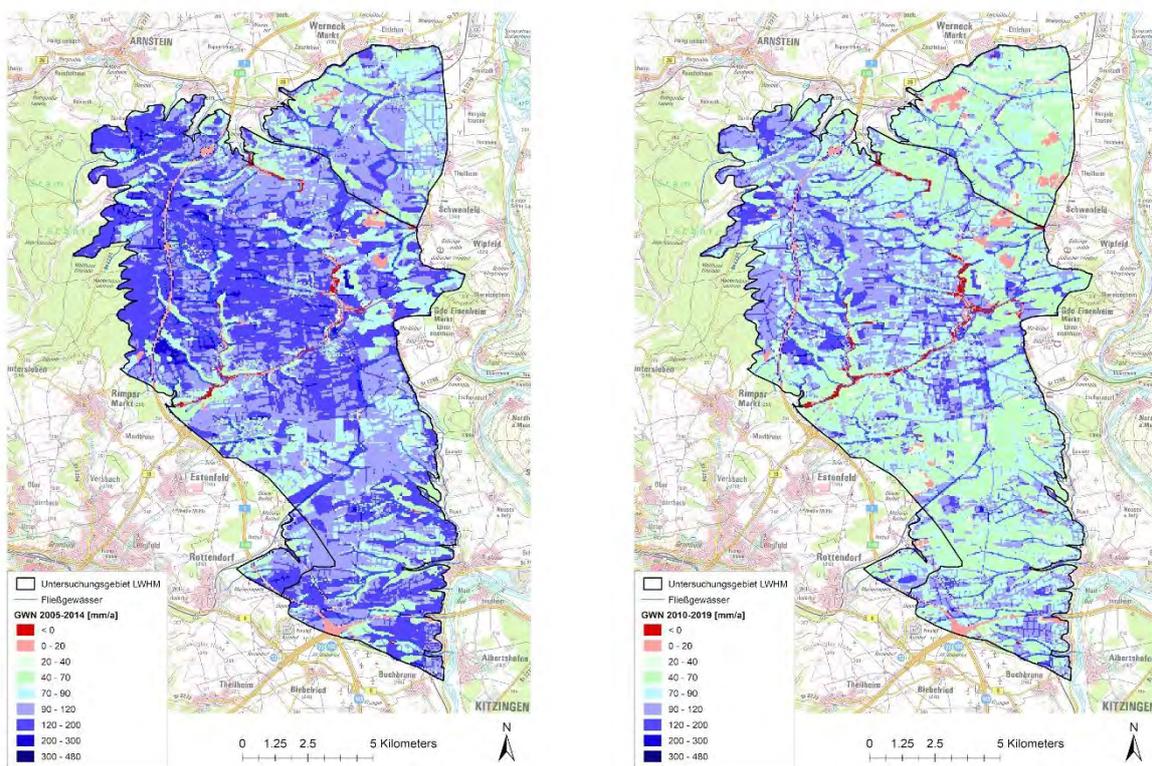


Abbildung 50: Jährliche Grundwasserneubildung als Sickerwasser in 2 m Tiefe, 2005-2014 (links) und 2010-2019 (rechts)

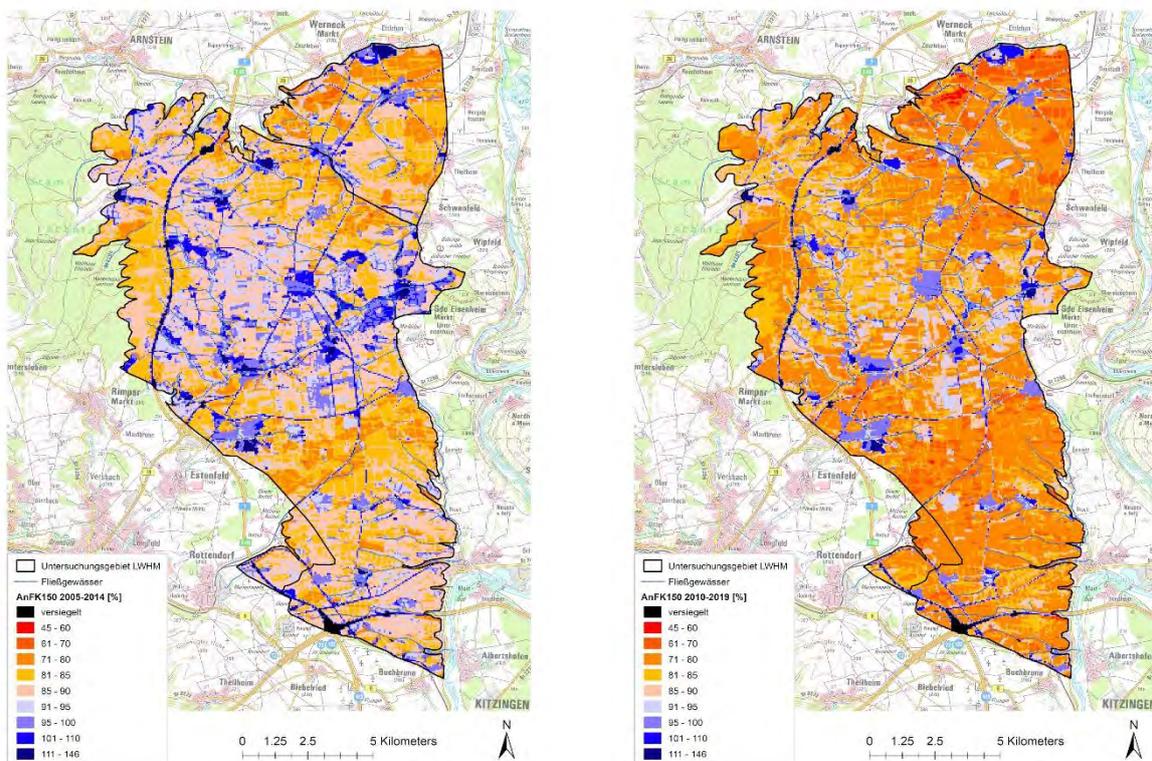


Abbildung 51: Mittlere Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe [%nFK] (AnFK150), 2005-2014 und 2010-2019

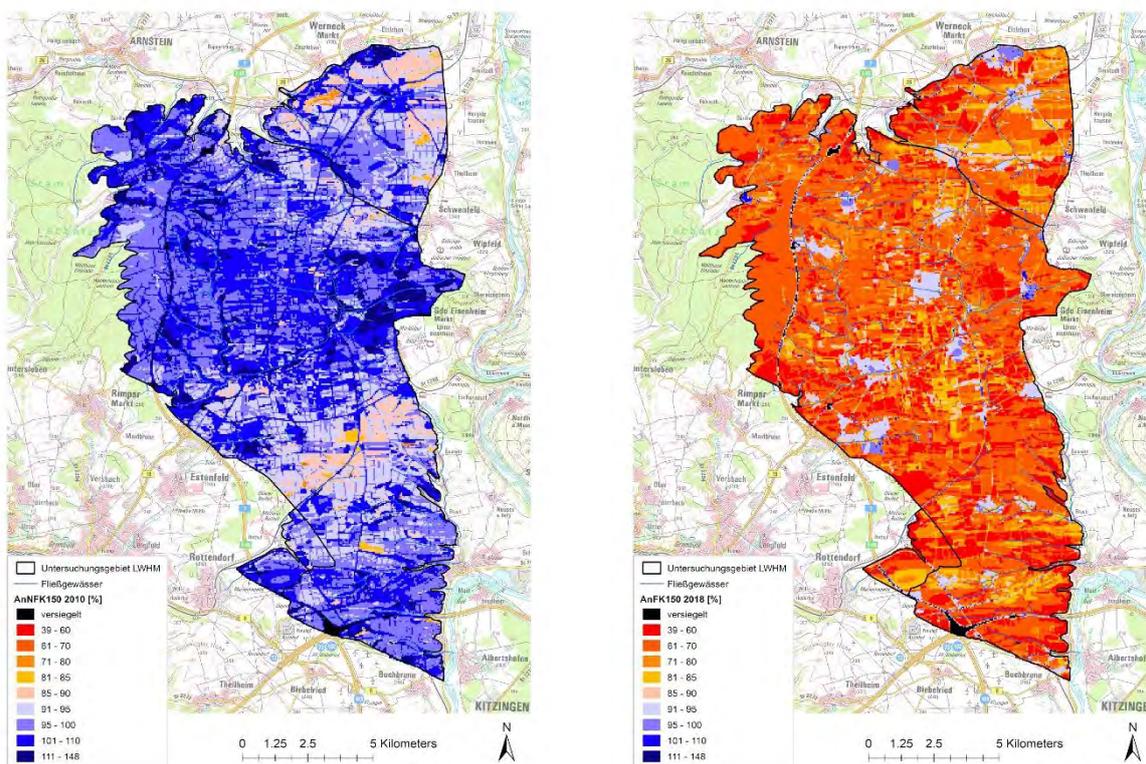


Abbildung 52: Mittlere Bodenfeuchte bis 1,5 m Tiefe [%nFK] (AnFK150) in einem Nass- (2010) und einem Trockenjahr (2018, rechts)

Die simulierte Feuchtesituation in dem extremen Trockenjahr 2018 (Abbildung 52) verdeutlicht die Abhängigkeit der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet von einer zielgenauen Bewässerung.

Die hier gezeigten Abbildungen, sowie weitere Darstellungen zur Verdunstung, der Bodenfeuchte und der Sickerwasserraten in den beiden Perioden und für das Nassjahr 2010 und das Trockenjahr 2018 (blau und rot markiert in Tabelle 13) sind in Anlage 5-1 als DIN-A3-Grafiken hoher Auflösung (jpg) enthalten.

Durch die hohe räumliche Auflösung des Modells konnte der große Einfluss der lokalen Gegebenheiten, wie der meteorologischen Bedingungen (Abbildung 38), der Landnutzung (Abbildung 28) und der Bodeneigenschaften (Abbildung 31), auf die räumlichen Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten deutlich erfasst werden.

Eine Möglichkeit zur Bewertung der Plausibilität der erzielten Simulationsergebnisse ist der Vergleich mit den Resultaten anderer Modelle im selben Untersuchungsraum. Im Rahmen des Vorhabens KLIWA erfolgte die flächendeckende Simulation des Bodenwasserhaushaltes und der Grundwasserneubildung für die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen mit dem Modell GWN-BW (KLIWA, 2017, Kopp et. al., 2018). Aus dieser Modellanwendung stehen für den Untersuchungsraum Bergtheimer Mulde Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsraten bis 2018 für einen Vergleich zur Verfügung. Das GWN-BW ist wie das BWHM-Bergtheimer Mulde ein modular aufgebautes, flächendifferenziertes Modell mit deterministischen und konzeptionellen Teilmodellen. Eine wesentliche Inputgröße, die Niederschlagsverteilung, ist identisch, da auch die REGNIE-Niederschläge verwendet wurden. Große Unterschiede gibt es hinsichtlich der deutlich gröberen räumlichen Auflösung (3.160 statt 85.015 Einzelflächen) und den verwendeten Eingangsdaten (Landnutzung nach Corine2000, Böden nach BÜK1000, Höhenmodell DGM50). Außerdem sind die simulierten Sickerwasserraten nicht vergleichbar. GWN-BW berechnet diese unterhalb der nutzungsspezifischen Wurzelzone. Diese beträgt bei Grünland 60 cm, bei Acker 100 cm und bei Wäldern 150 cm. Außerdem werden die schnellen Oberflächenabflüsse TKR, RO

und RH nicht simuliert. Über die Anwendung eines Baseflow-Index BFI werden diese Abflusskomponenten indirekt bei der Berechnung der Grundwasserneubildung aus den Sickerwasserraten berücksichtigt. Die Ableitung des BFI erfolgt einzugsgebietspezifisch auf der Grundlage langer Abflussreihen und der Berücksichtigung von hydrogeologischer, pedologischer und topologischer Gebietseigenschaften (Abbildung 53).

Entsprechend dieser Einschränkungen können die mit dem BWHM-BergtheimE berechneten Sickerwassermengen (Abbildung 50) weder mit den Sickerwasserraten noch den daraus abgeschätzten Grundwasserneubildungsraten des GWN-BW (Abbildung 53), direkt verglichen werden. Diese Einschätzung wird auch von den Modellierern am LfU, die mit dem GWN-BW arbeiten, geteilt³. Jedoch zeigt die Gegenüberstellung der Abbildungen, dass beide Modelle die gleiche Größenordnung dieser Wasserhaushaltskomponenten berechnen – insbesondere, wenn man auch die schnellen lateralen Abflusskomponenten (Abbildung 49) mitberücksichtigt.

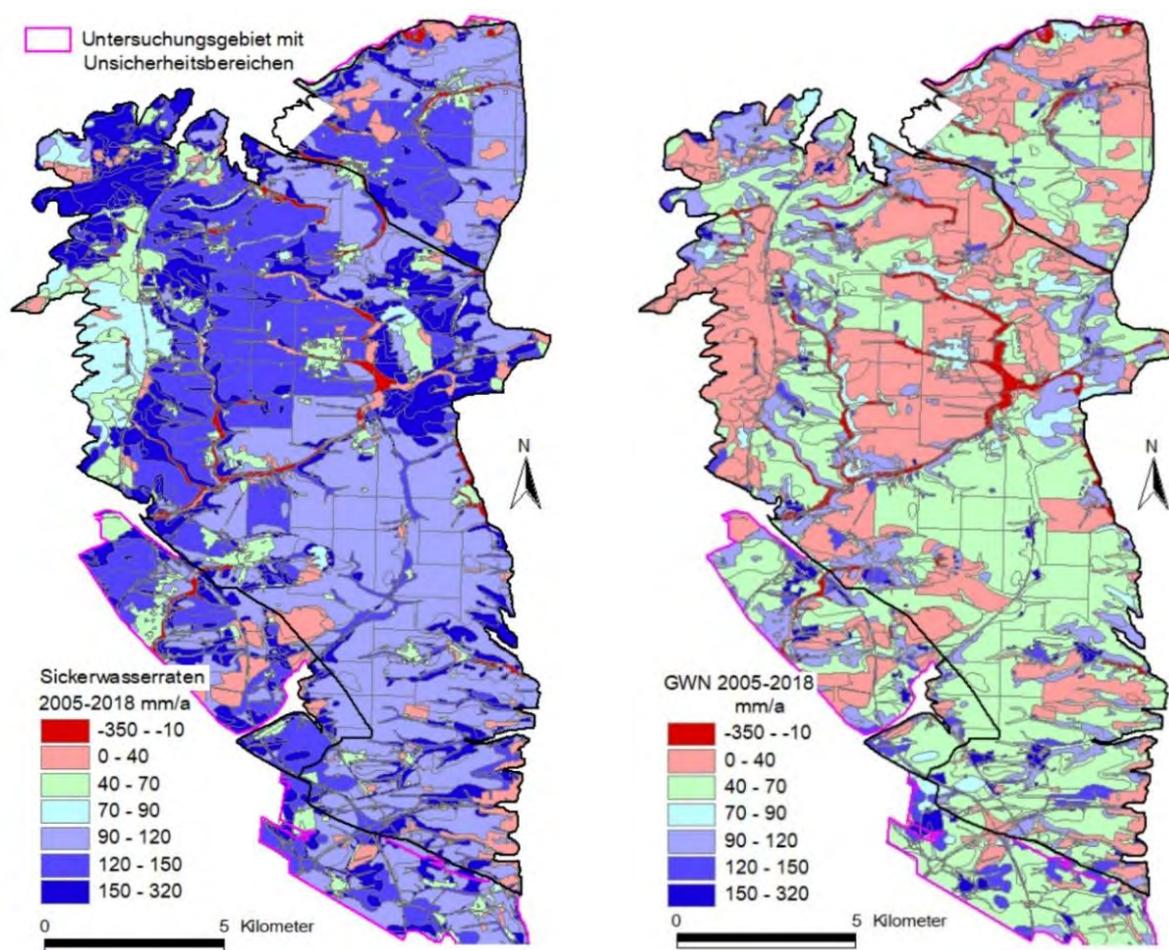


Abbildung 53: Mit GWN-BW simulierte jährliche Sickerwasserbildung (links) und Grundwasserneubildung (rechts), 2005-2018

³ Persönliches Gespräch mit A. Blomenhofer

6.4.3 Gewässerabflüsse

Die Modellvalidierung von Wasserhaushaltsmodellen erfolgt zumeist durch den Vergleich der simulierten mit den beobachteten Durchflussdaten an den vorhandenen Durchflusspegeln der oberirdischen Gewässer des Untersuchungsgebietes. Da derzeit nur für den außerhalb des Untersuchungsgebietes gelegenen Pleichachpegel in Würzburg Abflussganglinien zur Verfügung stehen, erfolgt hier nur ein qualitativer Vergleich mit den simulierten Abflüssen an den neu errichteten Pegeln an Pleichach, Kürnach und dem Schernauer Bach (s. Abbildung 27).

Für den Pleichachpegel in Würzburg liegen Terminmessung der Durchflüsse für den Zeitraum 01.11.1970 -10.12.2019 in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (< 1 d) vor. Daraus wurde eine Zeitreihe der Tagesmittel berechnet, einer Vollständigkeitsprüfung unterzogen und hinsichtlich von Grenzwertfehlern (Einhaltung eines plausiblen Wertebereiches) und Konsistenzfehlern (zeitliche Dynamik ist plausibel) untersucht. Da kein direkter Vergleich dieser Ganglinie mit simulierten Durchflusswerten möglich war, wurden die auf die jeweiligen Einzugsgebiete (EZG) bezogenen Abflüsse der vier Pegel verglichen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Pegel mit ihren Einzugsgebieten (EZG) und den gemessenen bzw. simulierten mittleren Abflusswerten MR bzw. mittleren Durchflüssen MQ (2005-2019)

Pegel	EZG [km ²]	FGW-ID*	MR [mm/d]	MQ [m ³ /s]
Pleichach, Würzburg	125,1	-	0,53	0,37
Pleichach, Mühlhausen	62,8	163	0,46	0,33
Kürnach	6,4	190	0,46	0,03
Schernauer Bach	7,5	53	0,38	0,03

* ID des Fließgewässerabschnitts FGW

Wie die Abbildung 54 zeigt, kann die an der Pleichach in Würzburg beobachtete Dynamik und auch die Größenordnung der Abflüsse durch das Modell gut wiedergegeben werden. Auf eine weitere Anpassung der Abflusssdynamik durch Kalibrierung der Parameter des internen Grundwassermodells wurde verzichtet, da das für das gekoppelte LWHM irrelevant ist. Auffällig sind die simulierten hohen Abflussspitzen, bedingt durch den modellierten hohen Anteil der schnellen oberflächennahen Abflusskomponenten RO, TKR und RH für die Kürnach (Abbildung 55). Eine Bewertung der Modellgüte kann jedoch erst bei Vorliegen einer ausreichend langen Abflussmessreihe (mindestens drei Jahre) des hier installierten neuen Pegels erfolgen.

Die Abflussspende des Einzugsgebietes des Schernauer Bachs (Abbildung 56) liegt mit 0,35 mm/d deutlich unter denen von Pleichach und Kürnach. Schnelle Abflussspitzen spielen hier eine untergeordnete Rolle.

Eine besonders hoch simulierte Abflussspitze im Zeitraum 08.- 13.01.2011 fällt auf. Nach einer längeren Kälteperiode mit hohen Niederschlägen hatte sich im Untersuchungsgebiet seit Ende November 2010 eine überdurchschnittlich mächtige Schneedecke aufgebaut. Ein plötzlicher Temperaturanstieg begleitet von hohen Niederschlägen führte zu einem schnellen Abschmelzen dieser Schneedecke innerhalb von sieben Tagen. Als Folge wurden z.B. für Pleichachpegel Mühlhausen Durchflüsse von bis zu 18 m³/s (Maximalwert am 13.01.2011) simuliert. Am Pleichachpegel Würzburg werden in diesem Zeitraum ebenfalls sehr hohe Abflüsse beobachtet, die jedoch unter den simulierten am oberliegenden Pegel in Mühlhausen lagen. In der Realität ist mit einer Verzögerung und Minderung dieser Abflussspitzen durch Zwischenspeicherung in Geländemulden und vor allem einer Ausuferung der kleinen Gewässer zu rechnen. Somit kann auch ein Teil zur Grundwasserneubildung beitragen. Dazu kommt noch die Unsicherheit bei der Simulation der Schneedynamik, die ebenfalls zu einer Überschätzung dieser Abflussspitze beigetragen haben kann.

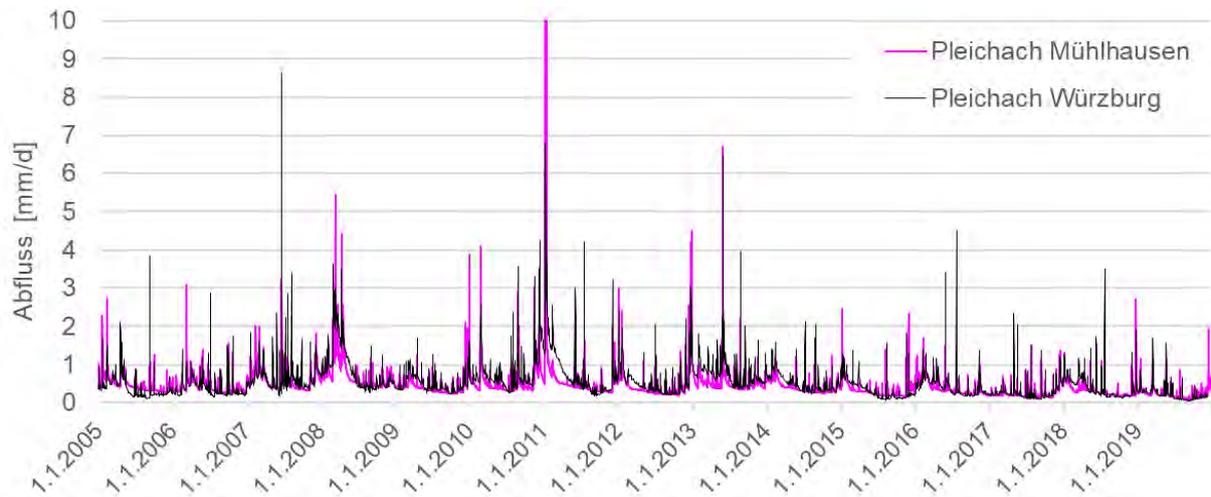


Abbildung 54: Simulierte Abflüsse der Pleichach in Mühlhausen im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen in Würzburg

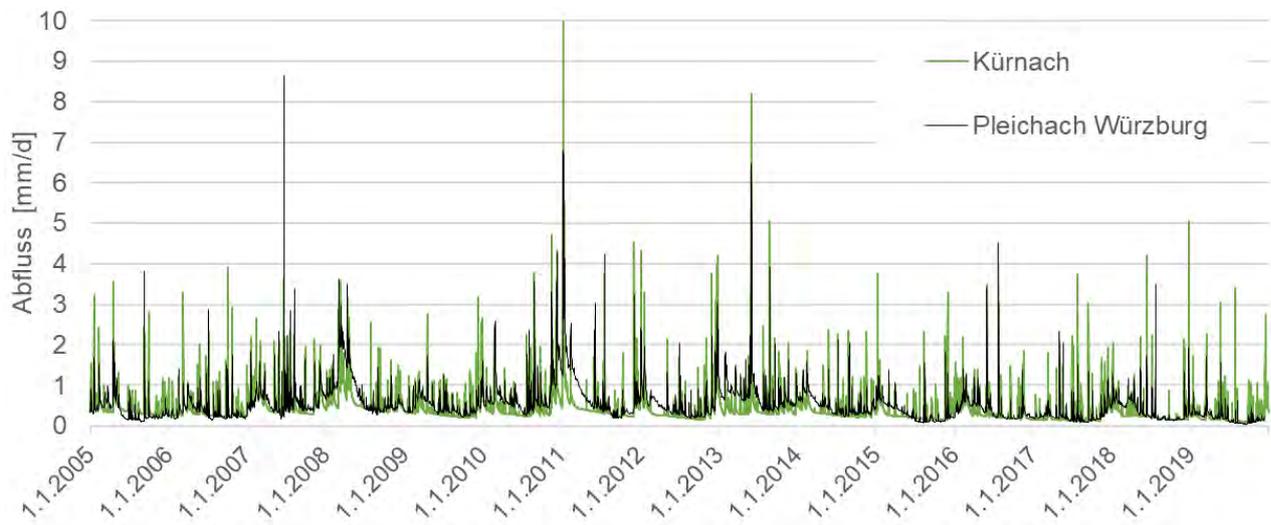


Abbildung 55: Simulierte Abflussspenden der Kürnach im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen an der Pleichach (Würzburg)

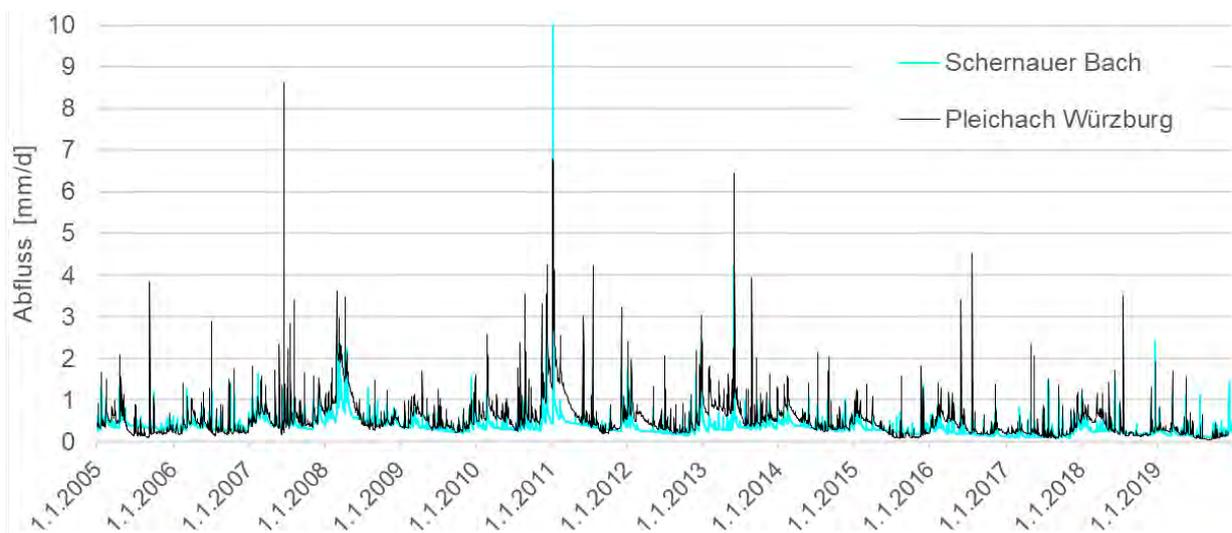


Abbildung 56: Simulierte Abflussspenden des Schernauer Baches im Vergleich mit den gemessenen Abflüssen an der Pleichach (Würzburg)

6.5 Zusammenfassung BWHM

Das Bodenwasserhaushaltsmodell wurde als Kombination eines detaillierten GIS-Modells und der Simulationssoftware ArcEGMO erstellt. Das GIS-Modell enthält folgende Karten mit den zugeordneten Parametern und Zeitreihen:

- Hydrotopkarte (85.015 Einzelflächen mit 50 x 50 m Kantenlänge) mit Informationen zur Landnutzung, dem Managementtyp und den Fruchtfolgen ackerbaulich genutzter Flächen, den Böden, Geländehöhe, -neigung und -ausrichtung, Zuordnung zum Kanalisationsnetz, zu einer Brunnengruppe und zu einem oberirdischen Teileinzugsgebiet,
- Fließgewässerkarte mit 305 Fließgewässerabschnitten mit Zuordnung zu je einem oberirdischen Teileinzugsgebiet und zu acht Modellausgabepunkten,
- Karte der 163 Teileinzugsgebiete (0,01 – 11,5 km²),
- Lage der Klimastationen und REGNIE-Stützstellen,
- Verortung der Brunnengruppen.

Insgesamt deckt das GIS-Modell eine Fläche von 212.54 km² ab, mit einer mittleren Geländehöhe von 279,3 m_{üNN} und einem mittleren Gefälle von 4.7 %. Für den Simulationszeitraum zuzüglich Modellvorlauf (01.01.2004 bis 31.12.2019) liegen lückenlosen Zeitreihen der benötigten meteorologischen Eingangsdaten vor.

Der erste Funktionstest erfolgte mit deaktiviertem Bewässerungsmodul. Außerdem wurde die Vegetationsdynamik mit einem vereinfachten Modellansatz auf der Basis mittlerer Entwicklungsverläufe einzelner Vegetationstypen beschrieben. Alle ackerbaulich genutzten Flächen wurden dafür dem Managementtyp 2 (Getreide-dominierte Fruchtfolge) zugeordnet.

In Zusammenarbeit mit lokalen Landwirten wurden Fruchtfolgen als Modellinput für das generische Vegetationsmodell VEGEN abgeleitet, die die regionalen Unterschiede der Bewirtschaftung der Ackerflächen widerspiegeln. Die Aktivierung dieses dynamischen Vegetationsmodells bei Berücksichtigung der Bewässerung führte zu plausiblen Ergebnissen. Die simulierten Wasserhaushaltskomponenten (Verdunstung, Grundwasserneubildung als Sickerwasser in 2 m Tiefe und schnelle Abflusskomponenten RO und RH) erscheinen hinsichtlich ihrer Größenordnung, Dynamik und räumlichen Ausprägung plausibel (Kap. 6.4.2). Ein Vergleich der simulierten (unkalibrierten) Abflussspenden an den drei neuen Pegelstandorten mit den beobachteten Abflüssen am Pleichachpegel in Würzburg (Kap. 6.4.3) ergab ebenfalls ein positives Bild.

7 Kopplung BWHM-Grundwasserströmungsmodell

7.1 Programmtechnische Umsetzung

Für das Einzugsgebiet der Bergtheimer Mulde bedarf es einer komplexen Lösung, die die hydrogeologischen und landschaftswasserhaushaltlichen Prozesse in dem Gebiet in seiner Gesamtheit erfasst. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Interaktion von Grundwasser und Bodenwasserhaushalt, die über die Grundwasserneubildung als Sickerwasser und die im Gebiet zur Bewässerung der landwirtschaftlichen Flächen installierten Brunnenanlagen miteinander verknüpft sind. Eine belastbare Modellierung des Landschaftswasserhaushalts ist daher nur mit einer Kombination aus einem numerischen Bodenwasserhaushalts- und einem numerischen Grundwassermodell umsetzbar. Als programmtechnische Lösung für die gekoppelte Modellierung der Bergtheimer Mulde kommt deshalb die im Büro für Angewandte Hydrologie entwickelte Kopplung zwischen FEFLOW und ArcEGMO zum Einsatz. Sie beruht auf der in FEFLOW vorhanden Schnittstelle, die es ermöglicht, ArcEGMO als Plug-In in FEFLOW zu integrieren. Somit lässt sich der Austausch von Flüssen und Potentialen zwischen den beiden Modellen in einer hohen zeitlichen Auflösung (täglich) simulieren. Der Transfer zwischen den beiden Modellen beruht auf der Übergabe der im Bodenwasserhaushaltsmodell berechneten räumlich aufgelösten Grundwasserneubildung (Versickerung aus der wechselfeuchten Bodenzone) an das Grundwassermodell und der Rückgabe der aktuellen Grundwasserstände unter Berücksichtigung von Grundwassernutzungen wie Entnahmen durch Bewässerungsbrunnen. Auf Basis dieser Grundwasserflurabstände und der Entnahmemengen werden wiederum die Bodenwasserhaushaltsgrößen für den neuen Zeitschritt berechnet. Die Sickerwassermengen aus ArcEGMO werden dabei als Materialeigenschaften an FEFLOW weitergegeben und die Grundwasserstände an den FEFLOW-Knoten den Elementarflächen in ArcEGMO zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt über eine flächengewichtete räumliche Mittelung aller Elementarflächenanteile innerhalb eines FEFLOW-Elements. Das gekoppelte Modell simuliert diese Prozesse auf verschiedenen Ebenen, Abbildung 57 stellt die Interaktion der einzelnen Modellkomponenten schematisch dar.

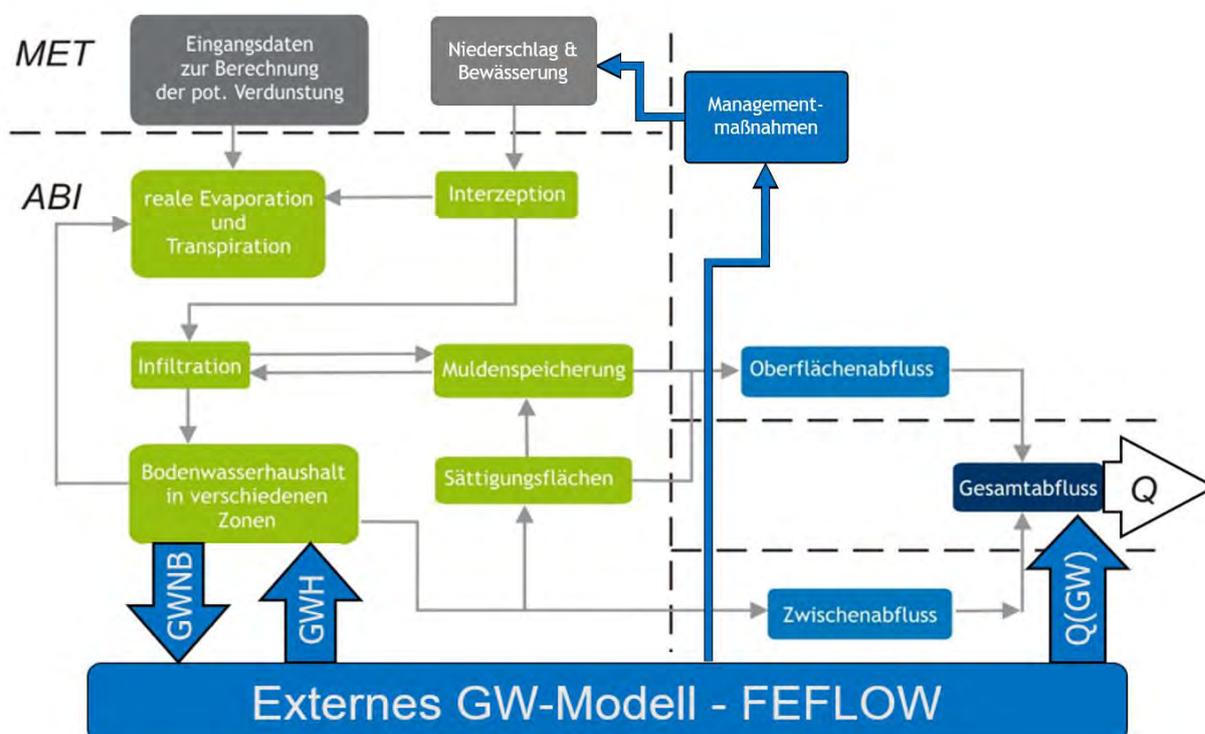


Abbildung 57: Interaktion der Modellteile untereinander und ihre Austauschgrößen (GWH = Grundwasserstand, GWNB = Grundwasserneubildung, Q(GW) = Grundwasserzufluss)

Weiterhin ermöglicht die Kopplung von ArcEGMO mit FEFLOW die Modellierung des Austauschs zwischen Grundwasser und Gewässern an der Oberfläche.

Dieser Austausch kann für vier verschiedene Fälle simuliert werden, je nachdem, ob sich Wasser im Oberflächengewässer befindet und ob der Grundwasserspiegel über der Gewässersohle liegt. Für den Fall, dass Wasser im Gewässer vorhanden ist und das Grundwasser über der Gewässersohle steht, wird der Austausch entweder als Randbedingung 3. Art mit fixer Transferfläche in FEFLOW oder als Brunnenrandbedingung mit variabler Transferfläche in ArcEGMO berechnet (effluent oder influent). Dasselbe gilt für den Fall, dass kein Wasser im Oberflächengewässer vorhanden ist (influent). Für den Fall, dass der Grundwasserspiegel unterhalb der Sohle liegt und das Gewässer Wasser führt, wird der Austausch über die Brunnenrandbedingung mit variabler Transferfläche in ArcEGMO ermittelt (effluent). Wenn sich kein Wasser im Gewässer befindet und auch der Grundwasserspiegel nicht über der Sohlhöhe steht, findet kein Transfer statt (No Flow). Tabelle 15 zeigt die angesetzten Randbedingungen für die verschiedenen Austauschszenerarien.

Tabelle 15: Überblick über die angesetzten Randbedingungen für die Berechnung des Austauschs zwischen Oberflächengewässern (ArcEGMO) und Grundwasser (FEFLOW)

	Wasser im Gewässer	kein Wasser im Gewässer
Grundwasserspiegel über Sohle Wasser-spiegel des anstehenden Gewässers	- Randbedingung 3. Art, in FEFLOW berechnet (fixe Austauschfläche) oder - Brunnenrandbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)	- Randbedingung 3. Art, in FEFLOW berechnet (fixe Austauschfläche) oder - Brunnenrandbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)
Grundwasserspiegel unterhalb Gewässer-WSP der Sohle	- Randbedingung 3. Art, in FEFLOW berechnet (fixe Austauschfläche) Brunnen-Randbedingung, Terme in ArcEGMO berechnet (variable Austauschfläche)	No flow

Da für die Simulation der Brunnenrandbedingung mit variabler Austauschfläche umfassende Gewässerprofilaten erforderlich sind, erfolgt die Simulation des Austauschs zwischen dem Oberflächengewässer und dem Grundwasser im Fall der Bergtheimer Mulde über FEFLOW als Randbedingung 3ter Art. Hierbei wird ein dem Gewässer zugeordneter Wasserspiegel mit dem Grundwasserspiegel am Schnittpunkt verglichen. Der Wassertransfer findet von höheren zum niedrigeren Wasserspiegel statt (effluent oder influent). Die Austauschrate bestimmt sich hierbei aus der Wasserspiegeldifferenz multipliziert mit einem der Gewässersohle zugewiesenen Austauschkoeffizient, sowie der Austauschfläche. Der Austauschkoeffizient, welcher die Kolmation im Gewässer abbildet, kann für effluente und influente Verhältnisse unterschiedlich sein. Die Austauschfläche kann der Geometrie des Gewässers entsprechend realitätsgetreu abgebildet werden, wobei die je nach Wasserstand variable Austauschfläche in ArcEGMO berechnet wird. Im vorliegenden Fall wird eine vereinfachte Geometrie angesetzt, welche als fixe Austauschfläche direkt in FEFLOW vorgegeben wird, da keine umfassenden Gewässerprofile für abflussabhängige Wasserstandberechnung zur Verfügung stehen.

Der Austausch vom Gewässer ins Grundwasser wird bei grundwasserfernen Gewässern in FEFLOW durch einen „minimum head constraint“ auf Höhe der Gewässersohle begrenzt. Das heißt die Wasserspiegeldifferenz für die Berechnung des Austauschs bei effluente Verhältnissen ist begrenzt, was der Tatsache

Rechnung trägt, dass die Exfiltration aus dem Gewässer ihr Maximum bei einem Grundwasserstand knapp unterhalb der Gewässersohle erreicht und danach kaum noch ansteigt.

Die räumliche Verknüpfung von ArcEGMO und FEFLOW erfolgt GIS-gestützt. Basis des gesamten räumlichen Informationsaustauschs sind dabei die GIS-Daten des ArcEGMO-Datenmodells, ergänzt mit Daten des in FEFLOW erstellte Gitter, wobei die Elementarflächen aus ArcEGMO mit den Gitter-Elementen aus FEFLOW verschnitten und die Fließgewässerabschnitte den Gitter-Knoten räumlich verknüpft werden.

7.2 Gebietsspezifische Kopplung der Modelle

Die Kopplung der beiden Modelle erfolgt, wie beschrieben, durch die Verschneidung der Modellelemente und Verknüpfung der Knotenpunkte. Hierzu wird das erzeugte 50x50 Meter Raster, das die 85.015 Elementarflächen aus ArcEGMO beinhaltet, mit den 219.209 Dreieckspolygonen aus FEFLOW verschnitten. In der daraus resultierenden Shapedatei sind die Identifikationsnummern der FEFLOW-Elemente und der Elementarflächen aus ArcEGMO, sowie die Fläche deren Schnittflächen erfasst. Bei der Übergabe der Grundwasserneubildung wird anhand dieser Datei die Zuordnung und flächengewichtete Verteilung der Sickerwassermengen vorgenommen. Für die Übergabe der Grundwasserhöhen werden über eine räumliche Verknüpfung die 110.825 Knoten aus FEFLOW den Elementarflächen in ArcEGMO zugewiesen. Zuletzt werden in der Shapedatei der FEFLOW-Knoten die Identifikationsnummern der Fließgewässerabschnitte mit den Knoten verknüpft, an denen der Austausch modelliert wird.

7.3 Anwendung

Die Übergabe des gekoppelten Modells erfolgt in einer bereits vorab angelegten Verzeichnisstruktur:

```
<Projektname>  
  → Arc_EGMO  
  → GIS  
  → Results  
  → Zeit.Dat
```

Im Arc_EGMO-Verzeichnis liegen wesentliche Steuerdateien (*.ste) im Textformat, im GIS-Ordner dbf-Tabellen (als Attributtabelle eines Shapes) mit beschreibenden Strukturdefinitionsdateien (*.sdf) und im Zeit.dat-Ordner Zeitreihen, ebenfalls als Textdateien.

Da es sich bei ArcEGMO nicht um eine kommerzielle Vertriebssoftware handelt, existiert keine einheitliche Installationsroutine. Aus diesem Grund erfolgt die „Installation“ über die Zuordnung des DLL-Verzeichnisses in den Umgebungsvariablen in Windows. Die DLL-Dateien (Dynamische Bibliotheken) sind als 64-Bit Version im Projektordner unter ...\\Arc_EGMO\\bin\\ bereitgestellt. Dieser Pfad ist unter „Einstellungen → System → Info → Erweiterte Systemeinstellungen → Umgebungsvariablen...“ in den Systemvariablen unter „Path“ hinzuzufügen.

Zudem kann es notwendig sein, die unter ...\\Arc_EGMO\\bin\\Installieren\\ hinterlegte „w_fcomp_xe_redist_intel64_2013.2.149.msi“ zu installieren. Diese enthält FORTRAN Bibliotheken, die für eine Nutzung aller Programmteile von ArcEGMO benötigt werden. Wenn diese nicht auf dem Rechner vorhanden sind, äußert sich dies in der Fehlermeldung „Die Anwendung konnte nicht korrekt gestartet werden (0xc000007b).“

Die Zuordnung der ArcEGMO.dll, die ebenfalls unter...\\Arc_EGMO\\bin\\ abgelegt ist, erfolgt wie folgt. Nach dem Starten von FEFLOW ist zunächst das zu bearbeitende FEFLOW-Projekt, d.h. die *.fem-Datei zu laden. Danach sollte im Plug-In-Panel von FEFLOW bereits ArcEGMO als Plug-In erscheinen. Falls kein Plug-In-Panel in der GUI vorhanden ist, ist dieses über „View->Panel->Plug-ins“ zu aktivieren. Die Zuordnung der ArcEGMO.dll erfolgt nun über „Rechtsklick-ArcEGMO->Properties...-> Reiter-General-> Target (Release)“. An dieser Stelle ist der Pfad zur gespeicherten ArcEGMO.dll anzugeben (...\\Arc_EGMO\\bin\\

ArcEGMO.dll). Zuletzt wird das Plug-In über „Rechtsklick-Attach“ aktiviert, falls dies nicht schon automatisch geschehen ist. Der Start der Schnittstelle gestaltet sich daraufhin analog zum standardisierten Start von FEFLOW über das Drücken des grünen „Play-Buttons“, woraufhin sich ein Verzeichnis-Dialog öffnet, in dem die ArcEGMO-Steuerdatei, „arc_egmo.ste“, im Projektverzeichnis ...\\Arc_EGMO auszuwählen ist. Vor dem Start kann zudem wie gewohnt ein *.dac-File als Ergebnisdatei über den roten „Record-Button“ gewählt werden.

Die Bedienung der Schnittstelle erfolgt somit hauptsächlich über die GUI von FEFLOW. Vor dem Start von Simulationen sind jedoch ArcEGMO-seitig einige Einstellungen vorzunehmen, um die oben beschriebenen Verknüpfungen zwischen der Datenbasis des FEFLOW- und ArcEGMO-Projekts programmtechnisch zu aktivieren. Hierzu sind in der Steuerdatei modul.ste im Abschnitt „GwRas2FEFLOW“ die dbf-Tabellen des Polygon-, Knoten-, sowie des Verschneidungsshapes anzugeben. Zusätzlich werden hier die Attribute zugeordnet, die in den Shapedateien bzw. in den zugehörigen dbf-Tabellen vorhanden sind. Dabei ist darauf zu achten, dass Attribute gleichen Inhalts den gleichen Namen aufweisen, d.h. das Attribut der Elementarflächen-ID ist sowohl im EFL-Cover des ArcEGMO-Projekts als auch in der Verschneidungsdatei gleich zu benennen. Gleiches gilt für die Knoten- und Polygon-Id's. Es folgt ein Auszug aus der Datei modul.ste.

```
#####
GwRas2FEFLOW
-----
FEM_Datei           Polygons_1L-BergtheimerMulde.dbf
FEFLOW_ELEMENT      Element
Area_FEM            Area
-----
FEMNodes_Datei    Nodes_1S-BergtheimerMulde.dbf
NodeId              Node
NodeHoehe           Z
NodeGWH             GWH
RASTER_Zuordnung   EFL_ID
*FGW_ZUORDNUNG     FGW
*MODELLRAND        Rand1
*BRUNNEN           BrunnenID
*FOERDERRATE       BrunnenQ /* positiv - Foerdereung, negativ - Einspeisung
*GRUNDWASSERPEGEL  PEGELID
-----
EFL2FEM_Datei     EFL2FE.dbf
EFL2FEM_ID          ID
Area_EFL2FEM        Area
EFL_ZUORDNUNG       EFLID
FE_ZUORDNUNG        Element
+++++
#####
```

Abbildung 58: Inhalt des Blocks GwRas2FEFLOW in der modul.ste

8 Untersuchungen zum Landschaftswasserhaushalt

8.1 Gekoppelte Modellierung des Ist-Zustandes (S0)

Im Anschluss an die Kalibrierung des BWHMs und des Grundwasserströmungsmodells wurden beide Modelle gekoppelt (Kapitel 7) und Berechnungen zum aktuellen Ist-Zustand des Landschaftswasserhaushaltes durchgeführt.

Zur Veranschaulichung der Eingangsparameter, dem Aufbau der Modelle sowie der Simulationsergebnisse können alle gewünschten Parameter des Bodenwasserhaushaltsmodells und des Grundwasserströmungsmodells graphisch ausgegeben werden. FEFLOW bietet ebenfalls die Möglichkeit, Modellergebnisse dreidimensional und oder als Animation über einen gewünschten Modellierzeitraum zu visualisieren. Dadurch kann ein sehr anschaulicher räumlicher und zeitlicher Eindruck über die Prozesse im Gebiet gewonnen werden. Parallel dienen folgende Kartendarstellungen zur Bewertung der Modellergebnisse:

- (1) Kartendarstellung der Parameter Bodenwassergehalt, Evapotranspiration, Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung und ihre Veränderung über die Zeit
- (4) Zeitreihen zu Grundwasserständen an ausgewählten Messstellen und Brunnen
- (5) Pläne zu Grundwasserströmungsrichtungen und -gleichen zu verschiedenen Zeitpunkten und Simulationsszenarien
- (6) Grundwasserdifferenzpläne zur lokal differenzierten Darstellung von Abweichungen zum Ende des Modellierungszeitraums.
- (7) Pläne zu den oberirdischen und unterirdischen Zustrom- und Abflusskomponenten

8.1.1 Ergebnisse Oberflächengewässer

In den folgenden Abbildungen sind exemplarisch die Ergebnisse der LWHM zu Durchflussdynamik der Oberflächengewässer den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM (vgl. Kap. 6.4.3) für drei Modellausgabepunkte gegenübergestellt. Wie die Abbildung 59 am Beispiel der Pleichach in Mühlhausen zeigt, sind die Ergebnisse in größeren Gebieten vergleichbar. Jedoch kann mit der gekoppelten Modellierung das Durchflussgeschehen kleinerer Fließgewässer deutlich differenzierter abgebildet werden (Abbildung 60, Abbildung 61).

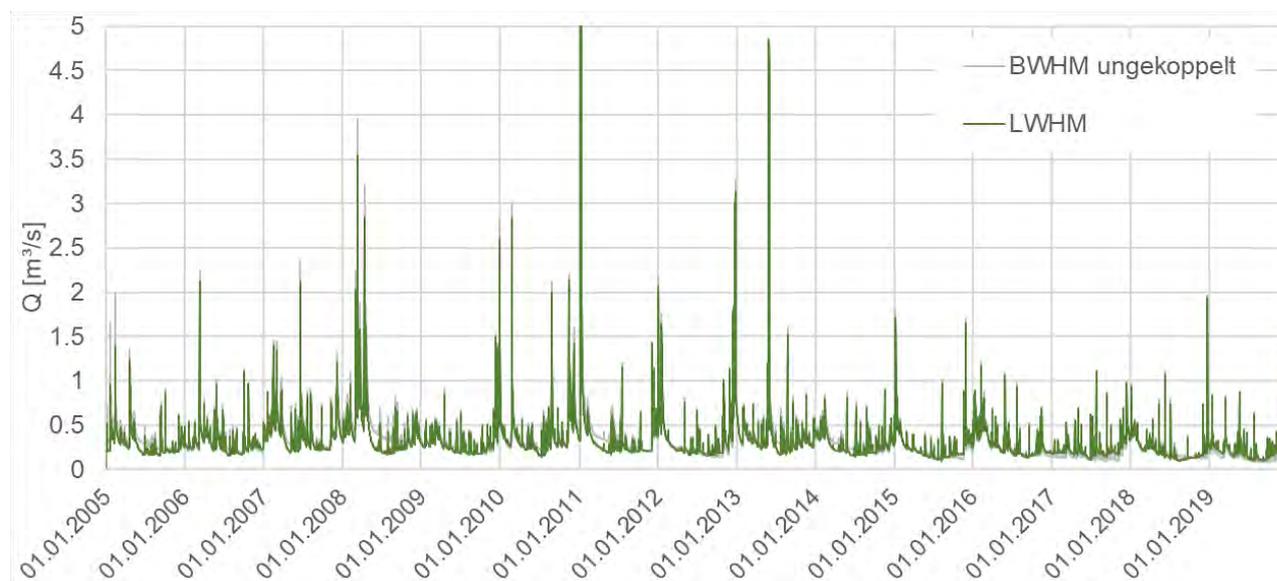


Abbildung 59: Simulierte Durchflüsse Q der Pleichach in Mühlhausen mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM

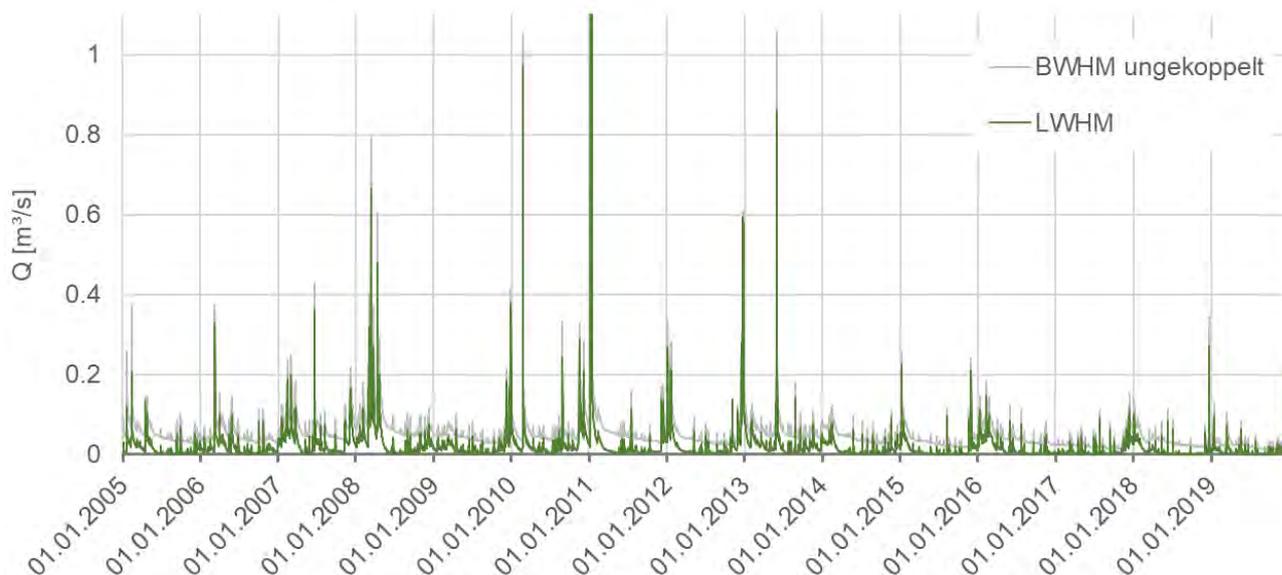


Abbildung 60: Simulierte Durchflüsse Q der Pleichach in Bergtheim mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM

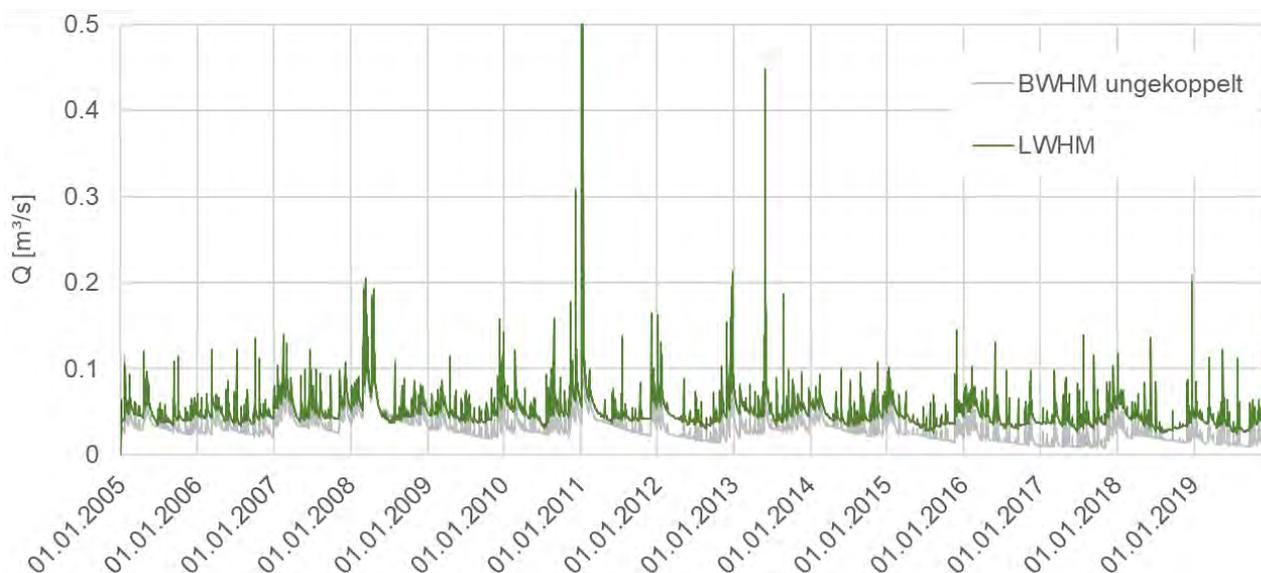


Abbildung 61: Simulierte Durchflüsse Q des Schernauer Baches mit dem gekoppelten LWHM im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem ungekoppelten BWHM

In Tabelle 16 sind die mit BWHM (ArcEGMO ungekoppelt) bzw. dem LWHM simulierten gewässerkundlichen Hauptzahlen (GKHZ) für acht Ausgabepunkte gegenübergestellt. Insgesamt werden durch das LWHM etwas geringere Hochwasserspitzen modelliert. Hauptursache hierfür ist, dass 30% der schnellen hypodermischen Abflüsse aus der Bodenzone als GW-Neubildungswirksam aufgefasst und nicht, wie im BWHM, als direkt abflusswirksam betrachtet werden. Im Niedrig- und Mittelwasser treten vor allem lokale Unterschiede auf. So wird im LWHM auch ein temporäres Trockenfallen der Pleichach an den Ausgabepunkten A3 und A1 simuliert.

Bei der Bewertung der gezeigten Ganglinien und GKHZ ist zu beachten, dass der Fokus der gekoppelten Modellierung nicht auf der Abbildung der oberirdischen Abflüsse lag. Hierfür wären detaillierte Kenntnisse der Gewässergeometrien und auch belastbare Zeitreihen der tatsächlich zu beobachteten Durchflüsse zur Modellkalibrierung erforderlich gewesen, die so nicht zur Verfügung standen.

Tabelle 16: Simulierte gewässerkundliche Hauptzahlen MNQ (mittlerer Niedrigwasserdurchfluss), MQ (Mittlerer Durchfluss) und MHQ (mittlerer Hochwasserdurchfluss) 1.1.2005-31.12.2019

ID	Ausgabepunkt	MNQ [m ³ /s]		MQ [m ³ /s]		MHQ [m ³ /s]	
		BWHM	LWHM	BWHM	LWHM	BWHM	LWHM
53	P Schernauer Bach - Mühle	0,02	0,04	0,03	0,05	0,38	0,38
79	A3 Pleichach Fährbrueck	0,01	0,000	0,02	0,004	0,16	0,14
93	A1 Pleichach Bergtheim	0,02	0,002	0,05	0,02	0,65	0,59
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld	0,09	0,09	0,19	0,18	2,04	1,91
159	A4 Grumbach Burggrumbach	0,05	0,05	0,11	0,10	1,04	0,97
163	P Pleichach Mühlhausen	0,15	0,15	0,33	0,31	3,31	3,10
190	P Kürnach	0,01	0,03	0,03	0,05	0,49	0,48
266	A5 Brumbach Essleben	0,02	0,02	0,04	0,04	0,41	0,38

8.1.2 Ergebnisse Bodenwasserhaushalt und Wasserhaushaltsgrößen

Unterschiede der simulierten Wasserhaushaltsgrößen zwischen ungekoppelter (Kapitel 6.4) und gekoppelter Modellierung des Bodenwasserhaushaltes ergeben sich erwartungsgemäß in den Niederungsbereichen der Fließgewässer, deren Böden direkt von Grundwasserspiegeländerungen beeinflusst werden. In diesen Bereichen mit hohen Grundwasserständen (Abbildung 62) wird eine deutlich höhere Verdunstungsleistung mit dem LWHM simuliert. Das betrifft 7 % der Gesamtfläche der Bergtheimer Mulde, wenn man Flächen mit regelmäßig Grundwasser-Überstau vernachlässigt. Diese Überstaufflächen (1,4 % Flächenanteil) müssen kritisch bewertet werden. Grundwasser-Überstau wird besonders an den Rändern des Untersuchungsgebietes (Abbildung 62, rechts oben, *schwarze Flächen*) und in Bereichen mit sehr heterogener Topographie simuliert. Hier ist durch die Randbedingungen und die unterschiedlichen Geometrien der Raumelemente von BWHM und GWM (vgl. Abbildung 26) mit Modellunsicherheiten zu rechnen. Besonders kritisch ist das an den Rändern des Untersuchungsgebietes, die sich für BWHM und Grundwassermodell leicht unterscheiden. Somit ergeben sich hier Elemente im BWHM, welche nur teilweise von Elementen des Grundwassermodells unterlagert werden. An diesen Flächen ergibt sich bei einer Mittelung der Grundwasserstände und Übertragung zwischen den Elementen des BWHM und des GW-Modells je nach Topographie und Geländeneigung ein rechnerischer Überstau.

Die im zentralen Bereich simulierten hohen Grundwasserstände mit gelegentlichen Überstau scheinen aber die realen Bedingungen widerzuspiegeln. Diese Bereiche decken sich mit den ausgewiesenen Feuchtbiotopen (Abbildung 62, rechts unten, blaue Flächen).

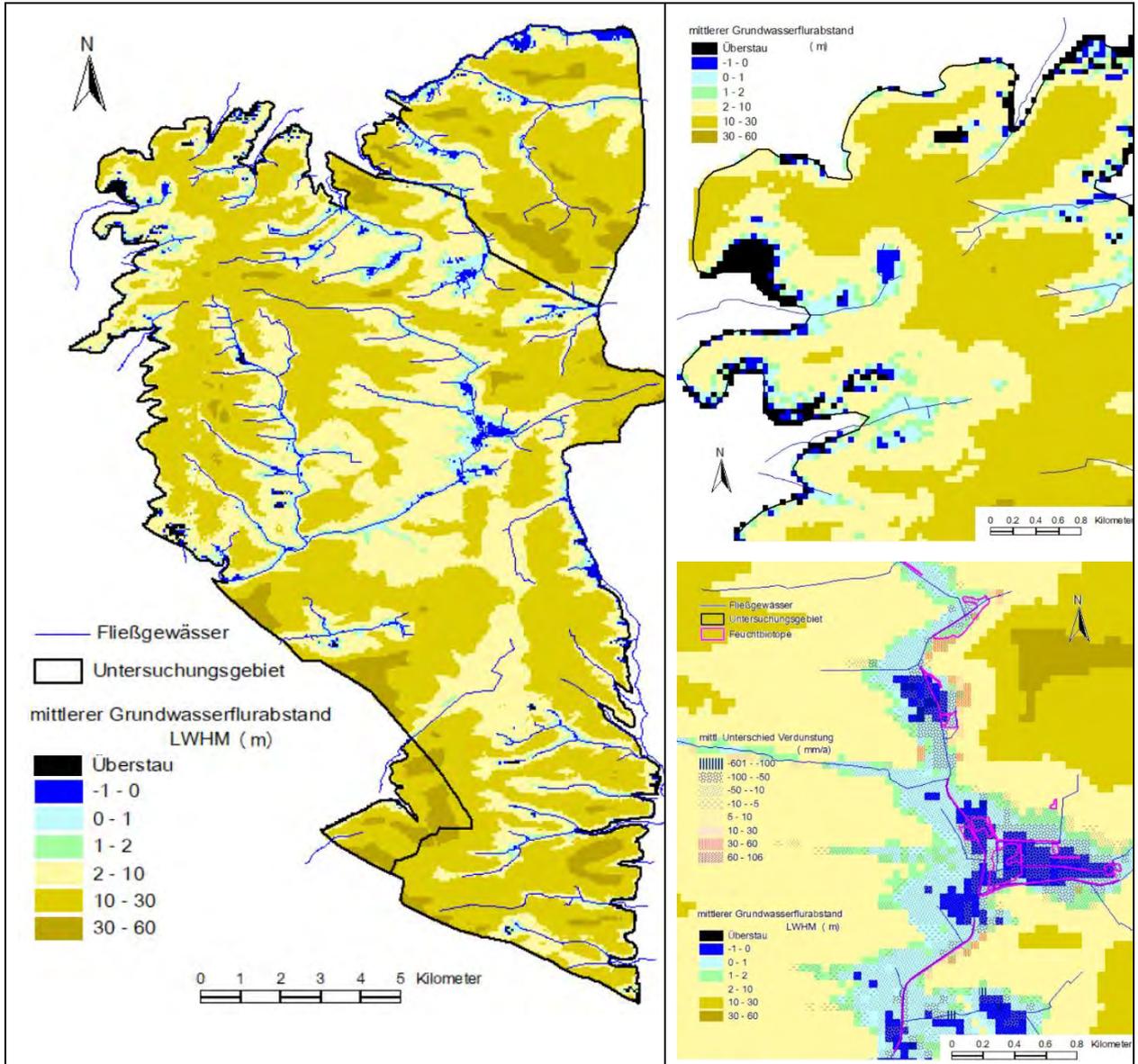


Abbildung 62: Mit dem LWHM berechneter Grundwasserflurabstand (Mittel 2005-2019), Gesamtgebiet, Rand und Zentralbereich mit dortigen Feuchtbiotopen und Verdunstungsdifferenzen (BWHM-LWHM)

8.1.3 Ergebnisse Grundwasserhaushalt

Die Auswertungen stützen sich im Wesentlichen auf Zusammensetzung und Veränderung der Komponenten des Grundwasserhaushalts. In der Darstellung wird zwischen dem gesamten Modellgebiet und dem kleineren Bilanzgebiet unterschieden. Das Bilanzgebiet umreißt den zentralen Bereich der Bergtheimer Mulde und schließt zum östlichen und westlichen Rand die oberirdischen Einzugsgebiete der Gewässer ein. Eine Abbildung des Bilanzgebiets findet sich in Abbildung 63, die Trinkwasserbrunnen sind in der Abbildung blau markiert, die Brauchwasserbrunnen rot und die Doppelmessstellen grün.

Die Hauptkomponenten der Grundwasserbilanz sind die Grundwasserneubildung und die Drainage über Oberflächengewässer. Untergeordnet machen sich die Abflüsse über die Modellränder (ausstreichende Schichten des Unteren Keuper) bemerkbar. Die Entnahme durch Brunnen und der Abstrom in den Oberen Muschelkalk ist im Vergleich zu den anderen Bilanzgrößen minimal.

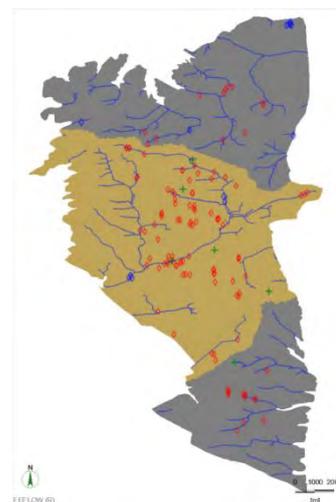


Abbildung 63: Abgrenzung Bilanzgebiet (gelb)

Tabelle 17: Grundwasserbilanzen Basisszenario S0, mittlerer Jahreswert und Anteil an Grundwasserneubildung

Zeitraum 2005-2019	Modellgebiet [m³/a]	Bilanzgebiet [m³/a]	Modellgebiet	Bilanzgebiet
Grundwasserneubildung	2,01E+07	1,03E+07	100%	100%
Oberflächengewässer	-1,91E+07	-7,90E+06	-95%	-77%
Zu-/ Abflüsse Modellrand	-2,31E+06	-3,82E+05	-12%	-4%
Brunnen (davon Trinkwasserbrunnen)	-7,08E+05 (-4,23E+05)	-4,95E+05 (-2,30E+05)	-4% (60%)	-5% (46%)
Abfluss oberer Muschelkalk	-5,28E+04	-4,15E+04	-0,3%	-0,4%
Gesamtbilanz	-2,10E+06	1,44E+06	-10%	14%

Die Bilanzen des Basisszenarios je Jahr für den Simulationszeitraum 2005-2019 ist in Abbildung 64 und Abbildung 65 für Modell- und Bilanzgebiet dargestellt. Über den Modellierungszeitraum verändert sich die Gesamtbilanz über das Modell- und Bilanzgebiet. Die Differenz zwischen Zu- und Abstrom entspricht der Speicheränderung im Kontrollvolumen (Modell- oder Bilanzgebiet) für den Betrachtungszeitraum. Während die Gesamtbilanz zwischen 2005 und 2013 um den Nullwert schwankt und für das Bilanzgebiet sogar überwiegend positiv ist, verlagert sich die Jahresbilanzsumme ab 2014 mit rückläufigen Neubildungsraten in den negativen Bereich. Den stärksten Schwankungen unterliegt die Grundwasserneubildung.

Die in Abbildung 64 mit aufgeführte „Imbalance“ steht hier nicht für eine tatsächlich unausgeglichene Bilanz, die in der instationären Modellierung gleichbedeutend mit einer Speicheränderung ist, sondern ist ein rein numerischer Parameter. Sie ist ein Indikator für den numerischen Fehler des Modells und sollte (wie hier) nahe 0 liegen.

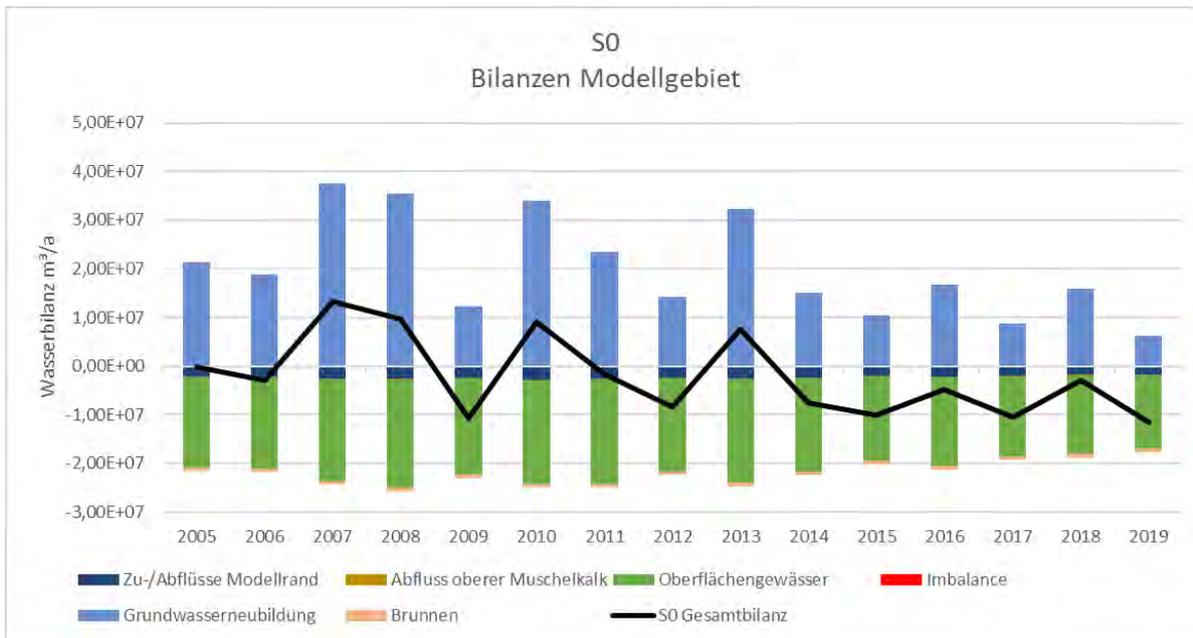


Abbildung 64: Grundwasserbilanz Basisszenario S0 - Modellgebiet

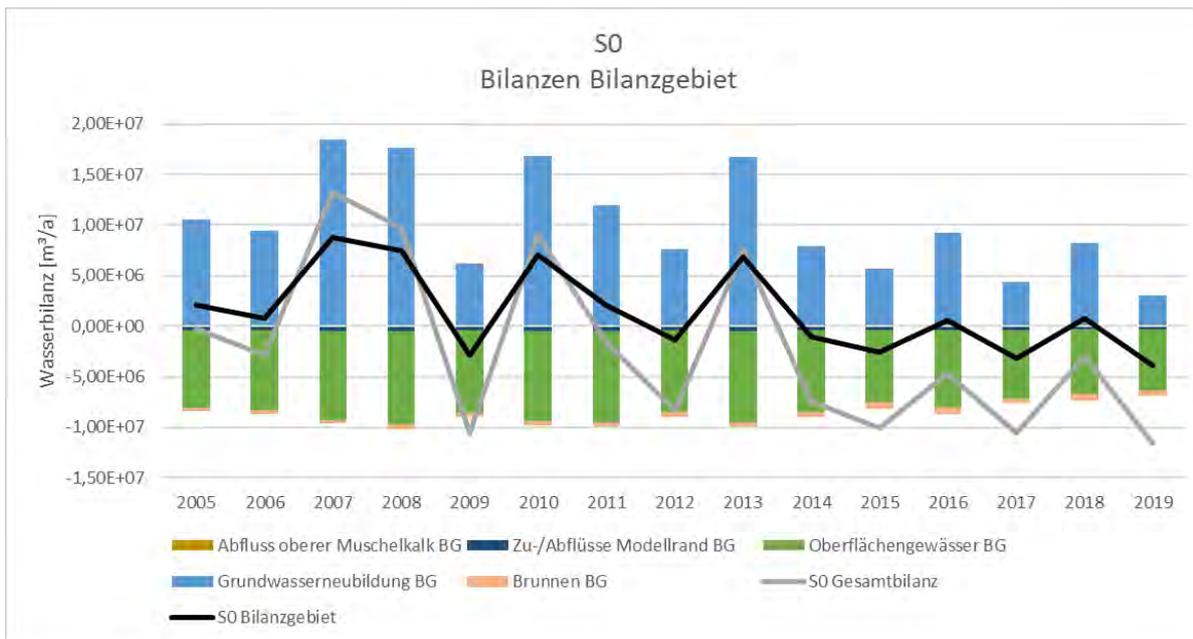


Abbildung 65: Grundwasserbilanz Basisszenario S0 - Bilanzgebiet

Die Grundwasserentnahmen machen bilanziell keinen großen Anteil an den Abflüssen aus dem Modellgebiet. Lokal sind die Brauchwasserentnahmen zur Bewässerung im Sommerhalbjahr deutlich an den Wasserspiegel zu erkennen. Im Jahr mit den höchsten Brauchwasserentnahmen (2015) wurden die Wasserspiegel zu Jahresbeginn (Januar) und zur Jahresmitte (Juli) im Modellgebiet verglichen (Abbildung 66). Die stärksten sommerlichen Grundwasserabsenkungen zeigen sich im durch Entnahmen stark beanspruchten Werksandstein (kuW). Hier zeigen sich auch weiträumig um die Brunnen Absenkungen von mehreren Metern.

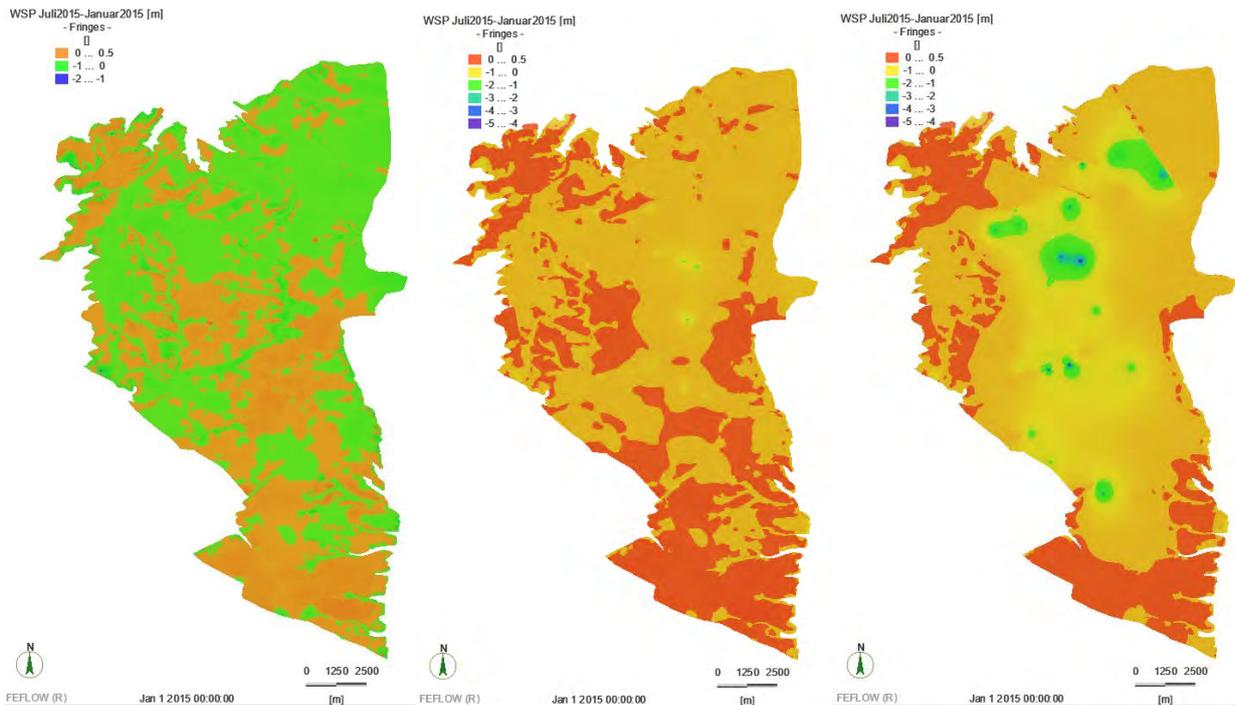


Abbildung 66: Wasserspiegelabsenkung im Sommer 2015 im Bereich der Deckschichten (links), im kuD (Mitte) und kuW (rechts)

Über den gesamten Simulationszeitraum beobachtete Wasserspiegelabsenkungen (im Mittel ca. 30-45 cm in der zentralen Bergtheimer Mulde im kuW und kuD) lassen sich nicht direkt an den Bewässerungsentnahmen festmachen, da hier der klimatische Einfluss überwiegt. Die Abgrenzung des Einflusses der Bewässerungsentnahmen wird in den Szenarienanalysen (Kapitel 8.2) untersucht.

An mehreren der sechs Doppelmessstellen und Beobachtungspunkte sind ab etwa 2014 sinkende Grundwasserspiegel zu verzeichnen (vgl. Abbildung 67). Dies betrifft vor allem die höher gelegenen Bereiche an den Muldenrändern. Bei den vergleichsweise trockenen Verhältnissen mit geringer Grundwasserneubildung und negativer Grundwasserbilanz (vgl. Abbildung 64 und Abbildung 65) ab 2014 laufen die Aquiferspeicher langsam leer. Das Grundwasser folgt dabei dem hydraulischen Gefälle hin zum Muldenzentrum. Im Muldenzentrum (untere Linien in Abbildung 67) fallen die klimatischen Effekte daher weniger ins Gewicht.

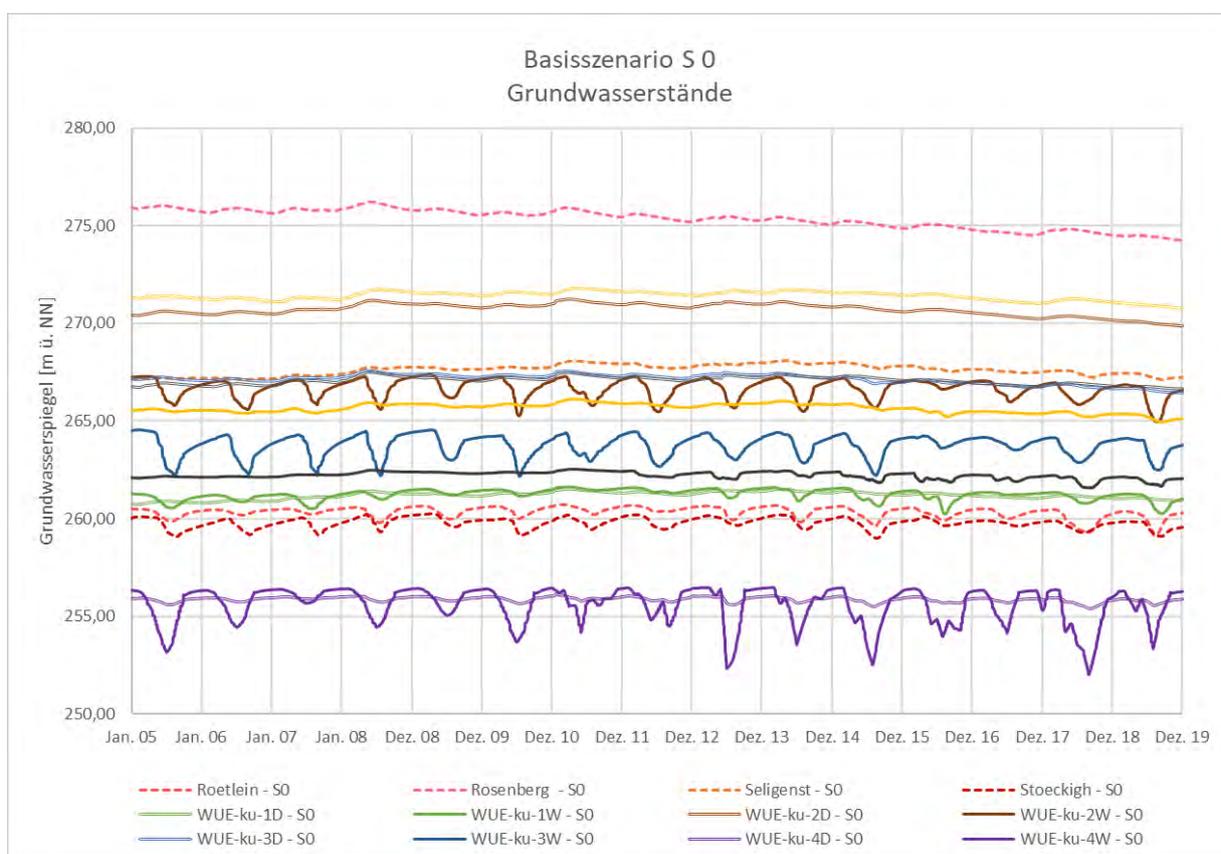


Abbildung 67: Basisszenario S0 - Ganglinien Grundwasserspiegel

8.2 Sensitivitäts- und Szenarioanalysen mit dem gekoppelte LWHM

8.2.1 Vorstellung der Szenarien

Zur Überprüfung der Funktionsweise des gekoppelten LWHM erfolgte eine schrittweise aufgebaute Sensitivitätsanalyse. Dies ermöglichte eine Einschätzung der Einflussnahme einzelner Modellparameter wie z.B. Niederschlag, Temperatur, Grundwasserentnahmen oder Landschaftsnutzung auf das dargestellte System und ist somit als Vorstufe von komplexen Szenarien-Berechnungen nötig.

Laut Aufgabenstellung waren folgende Analysen vorgegeben:

- A) schrittweise (positive und negative) Veränderung der meteorologischen Eingangsparameter Niederschlag und Temperatur,
- B) schrittweise (positive und negative) Variation der landwirtschaftlichen Grundwasserentnahme,
- C) schrittweise Vergrößerung/Verkleinerung des Anteils bewässerter Ackerfläche.

Bei diesen Untersuchungen wird also zunächst nur einer der genannten Parameter verändert. Über die Analyse der Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit (Grundwasserneubildung, Grundwasser) wird das Verständnis für die Wirkungszusammenhänge im Gebiet verbessert.

In Abstimmung mit dem AG wurden folgende Modellläufe mit dem LWHM durchgeführt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Szenarien zur Sensitivitätsbewertung

ID	Variantenbezeichnung	Parameteranpassung	Bemerkung
S1-1	Klima positive Änderung	Erhöhung Lufttemperatur um 1,5°C Erhöhung der Niederschläge um 10 %	Basis: Ist-Klima Tageswerte werden korrigiert
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	Quotient aus langjähriger Förderung und Maximalentnahmen 2015-2019 Gleichmäßige Verteilung auf alle Brunnen
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	Umwandlung Fruchtfolge 2, 3, 4 (Getreide) in Fruchtfolge 5, 6 oder 7 (Gemüse), einbezogen werden Brunnengruppen mit derzeit hoher Förderung
S3-2	Anteil bewässerte Flächen negative Änderung	Verringerung bewässerter Flächen um 25 % (-416 ha), Klima wie S0	Umwandlung Fruchtfolge 5, 6 oder 7 in Fruchtfolge 2 (Getreide), einbezogen werden fast alle Brunnengruppen

An diese Sensitivitätsstudien schlossen sich weitere Szenarien primär zur Bewertung des Entnahmepotenzials an (Tabelle 19). Als Basis für die Bewertung dient die Simulation des Ist-Zustandes, im Folgenden als „S0“ bezeichnet.

Tabelle 19: weitere Szenarien

ID	Variantenbezeichnung	Parameteranpassung
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

Durch die Szenarien wird keine Verschiebung der innerjährlichen Verteilung der KWB simuliert. Jedoch verschärft sich die Situation unter den Bedingungen der Szenarien S1-2 und WS1 (Trockenjahr) deutlich. Hier kommt es schon im März zu negativen Werten (Abbildung 68). Die Unterschiede zwischen den Szenarien S1-1 und WS2 (Nassjahr) hinsichtlich der mittleren monatlichen KWB sind in den Wintermonaten (November – Februar) sehr klein, da sich dann bei gleichen Niederschlagsmengen die Grasreferenzverdunstungswerte trotz unterschiedlicher Lufttemperaturen kaum unterscheiden. In der Hauptvegetationsperiode (Mai-August) bewirken die um 1,5 K höheren Lufttemperaturen des Szenarios S1-1 jedoch eine deutliche Erhöhung der potenziellen Verdunstung und damit Senkung der KWB, was zu deutlich niedrigeren mittleren Jahreswerten der KWB führt (Tabelle 20).

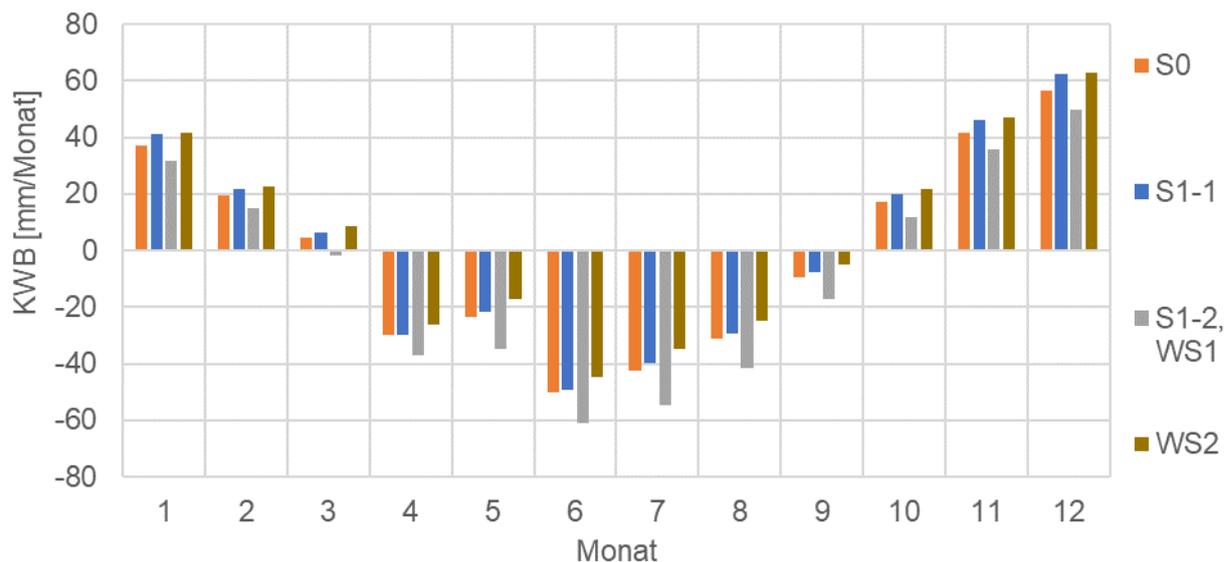


Abbildung 68: Innerjährliche Verteilung der Klimatischen Wasserbilanz KWB als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für die Klima-Szenarien

8.2.2 Änderung des Gebietswasserhaushalts unter den Szenariobedingungen

In Tabelle 20 sind die simulierten Wasserhaushaltsgrößen als mittlere Jahressummen für den gesamten Simulationszeitraum zusammengestellt. Somit ist eine erste Einschätzung der Wirkung der einzelnen Szenarien möglich. Entsprechend der im Gebietsmittel geringen Zusatzwassermengen von 1 bis 3 mm/a pro Quadratmeter ist die Wirkung der Variation von Bewässerungsmenge und -fläche (Szenarien S2, S3 und B) auf den Gebietswasserhaushalt als Ganzes nur sehr gering. Die Grundwasserneubildung liegt zwischen 91 mm/a (ohne Bewässerung) und 93 mm/a (B2: genehmigte Entnahmemengen).

Deutlich stärker ist die Wirkung der Klimavariationen. Die Sickerwassermengen unter den Bedingungen des Szenarios S1-2 und des Trockenjahrszenarios WS1 liegen mit 48 bzw. 49 mm/a (in Tabelle 20 rot markiert) deutlich unter den mittleren Spenden von 92 mm/a und den für die Szenarien S1-1 und Nassjahr WS2 berechneten Werten von 118 bzw. 134 mm/a (in Tabelle 20 blau markiert). Die durch die Erhöhung der Lufttemperatur um 1,5 °C bewirkte Erhöhung des potentiellen Verdunstungsbedarfs (GRV) um 32 mm/a kann im Trockenszenario aufgrund des begrenzten nutzbaren Bodenwasservorrats in der Wurzelzone nicht befriedigt werden. Die nur lokal ausgebrachten Bewässerungsmengen verändern auch bei einer Zunahme um 10 % im Szenario WS1 die Situation für das Gesamtgebiet kaum.

Tabelle 20: Wasserhaushaltsgrößen der einzelnen Szenarien (SZ) als mittlere Jahressumme 2005-2019 [mm/a], ZW: Zusatzwasser

SZ	Klima	ZW	ZW-Fläche	GRV	Nied	KWB	ZW	ER	RO	RKT	RH	GWN
S0	S0	S0	S0	632	622	-10	1,3	489	13	14	22	92
S1-1	LT+ Nied+	S0	S0	664	685	20	1,2	512	20	15	29	118
S1-2	LT+ Nied-	S0	S0	664	560	-104	1,2	487	7	12	14	48
S2-1	S0	1,3 * S0	S0	632	622	-10	1,6	490	13	14	22	92
S2-2	S0	0,7 * S0	S0	632	622	-10	0,9	489	13	14	22	92
S3-1	S0	S0	+25%	632	622	-10	1,3	489	13	14	22	92
S3-2	S0	S0	-25%	632	622	-10	1,3	490	13	14	22	91
B1	S0	-	-	632	622	-10	0	489	13	14	22	91
B2	S0	genehmigt	+25%	632	622	-10	3,0	489	13	14	22	93
WS1	S1-2	1,1 * S0	S0	664	560	-104	1,4	487	7	12	14	49
WS2	nass	0,9 * S0	S0	629	688	59	1,1	497	23	15	31	134

Dieser Eindruck bleibt auch bei der Darstellung der innerjährlichen Verteilung der Wasserhaushaltsgrößen als Gebietsmittel bestehen. Im Folgenden sind exemplarisch die Verläufe für die Verdunstung ER (Abbildung 69) und die Sickerwasserspende in 2 m Bodentiefe (Abbildung 70) dargestellt. Die unterschiedlichen

Ergebnisse für die einzelnen Szenarien beweisen die Sensitivität des Modells gegenüber der Variation der Eingangsdaten. Wie bereits erläutert, sind die Unterschiede bei der realen Verdunstung nur klein besonders während der Vegetationsperiode mit bis zu 10 mm/Monat. Wesentlich deutlicher sind die Unterschiede bei der Sickerwasserbildung, primär getrieben von der Veränderung der Niederschlagsmenge.

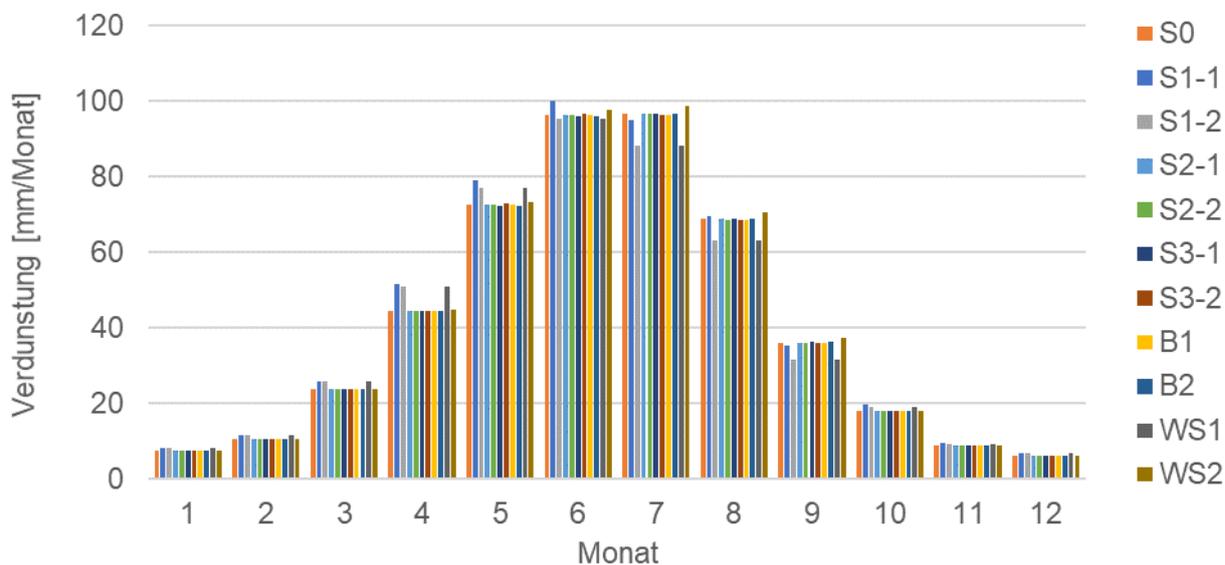


Abbildung 69: Innerjährliche Verteilung der realen Verdunstung als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für alle Szenarien

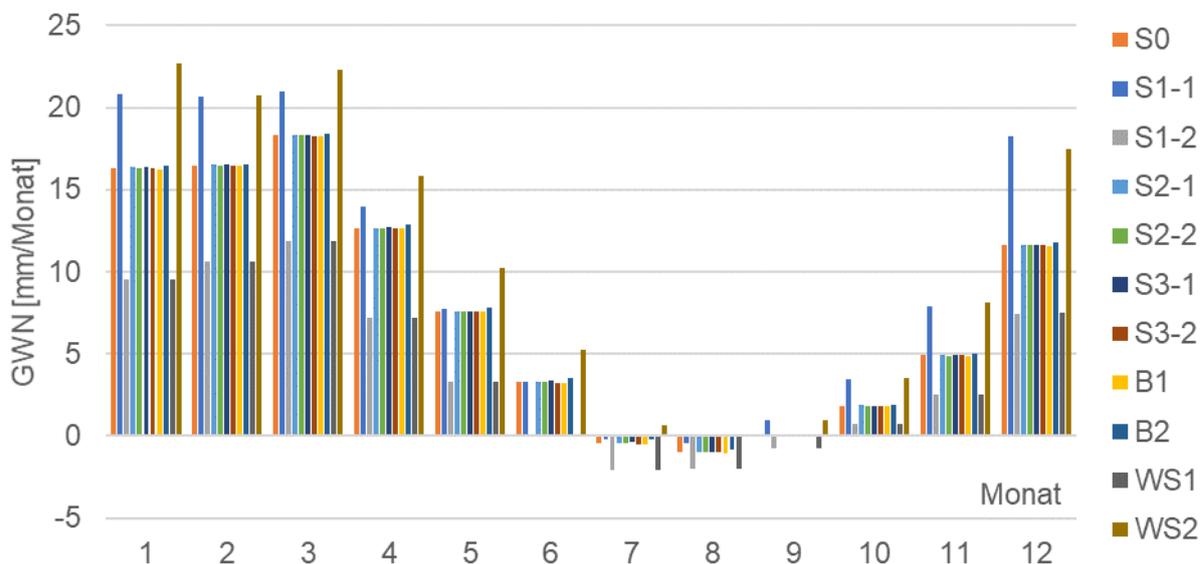


Abbildung 70: Innerjährliche Verteilung der Sickerwasserbildung in 2 m Tiefe (GWN) als Mittel über den Gesamtzeitraum 2005-2019 für alle Szenarien

8.2.3 Einfluss der Bewässerungslandwirtschaft auf Verdunstung und Versickerung

Auch wenn der Einfluss der Bewässerungslandwirtschaft auf Verdunstung und Versickerung im Gebietsmittel nur klein ist (vgl. Kap. 8.2.2), kann es lokal zu einer spürbaren Verschiebung der Wasserbilanz kommen. Betrachtet man allein die potenziell bewässerten Flächen hinsichtlich des Anteils zusätzlicher Verdunstung und Abflussbildung an der angewandten Bewässerungsmenge, so ergibt sich folgendes Bild:

Idealerweise würde das Zusatzwasser zu fast 100 % verdunstungswirksam, also in die Pflanzenbiomasse gehen, wenn nach Bedarf beregnet wird. Jedoch kann in der Praxis dieser Idealzustand häufig nicht erreicht werden. In Abhängigkeit von den Standortbedingungen und den aktuellen Witterungsverhältnissen geht ein Teil des Zusatzwassers durch Tiefensickerung und oberflächennahe Abflüsse der Pflanzenproduktion verloren. Wie in Kapitel 6.2.7 beschrieben, wurde aufgrund der fehlenden Datenbasis bei der Modellierung mit vereinheitlichten Fruchtfolgen gearbeitet. Die zeitliche und räumliche Beregnung der in den Brunnen geförderten Wassermengen erfolgte ebenfalls stark vereinfacht (einheitliche Aufteilung der Monatssummen in Tagesmengen ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Bedarfs auf den potenziell bewässerten Flächen und der aktuellen Witterung). Je nach Boden, Zuordnung zu Brunnengruppen und aktueller Vegetation ergibt sich so eine räumlich unterschiedliche Aufteilung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten, wie Abbildung 72 für den Zentralbereich des Untersuchungsgebietes verdeutlicht. Dargestellt sind hier die im Ist-Zustand (S0) jährlich aufgebrauchten Zusatzwassermengen als Mittel über die Periode 2010 – 2019 und die dadurch bewirkten Veränderungen hinsichtlich Verdunstung und Sickerwasserbildung in 2 m Tiefe gegenüber dem unbewässerten Zustand (Szenario B1). Eine signifikante Erhöhung der schnellen oberflächennahen Abflüsse RO und RH durch die Bewässerung tritt nur bei wenigen Flächen und hohen Bewässerungsmengen auf und ist deshalb räumlich nicht dargestellt.

In Tabelle 21 sind die Zusatzwassergaben und die dadurch bewirkten Veränderungen hinsichtlich Verdunstung, schneller oberflächennaher Abflüsse und Sickerwasserbildung gegenüber dem unbewässerten Zustand (Szenario B1) als Median über alle potenziell bewässerten Flächen für die Periode 2010-2019 zusammengefasst. Durch Klassifikation der Bewässerungsflächen hinsichtlich des Anteils von Verdunstungs- bzw. Sickerungsänderung an der Zusatzwassermenge (Abbildung 71) kann eine weitere Untersetzung dieser mittleren Werte erfolgen. Auf 56 % der Bewässerungsfläche wird mehr als 40 % des Zusatzwassers verdunstet. Eine fast vollständige Nutzung für die Pflanzenproduktion wird jedoch nur auf 6 % der bewässerten Flächen erreicht. Entsprechend sind die Anteile der GWN am Zusatzwasser. Bei den 17 % der Flächen mit einem sehr hohen GWN-Anteil (> 60 %) handelt es sich immer um stark bewässerte Flächen. Hier ist mit einer hohen Unsicherheit der Simulationsergebnisse zu rechnen, da eine Diskrepanz zwischen Fördermengen und zugeordnete Bewässerungsflächen besteht (s. Tabelle 12).

Tabelle 21: 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 [%]		
	Δ ER	Δ RO+RH	Δ GWN	ER	RO+RH	GWN
13	6	1	5	42	11	43

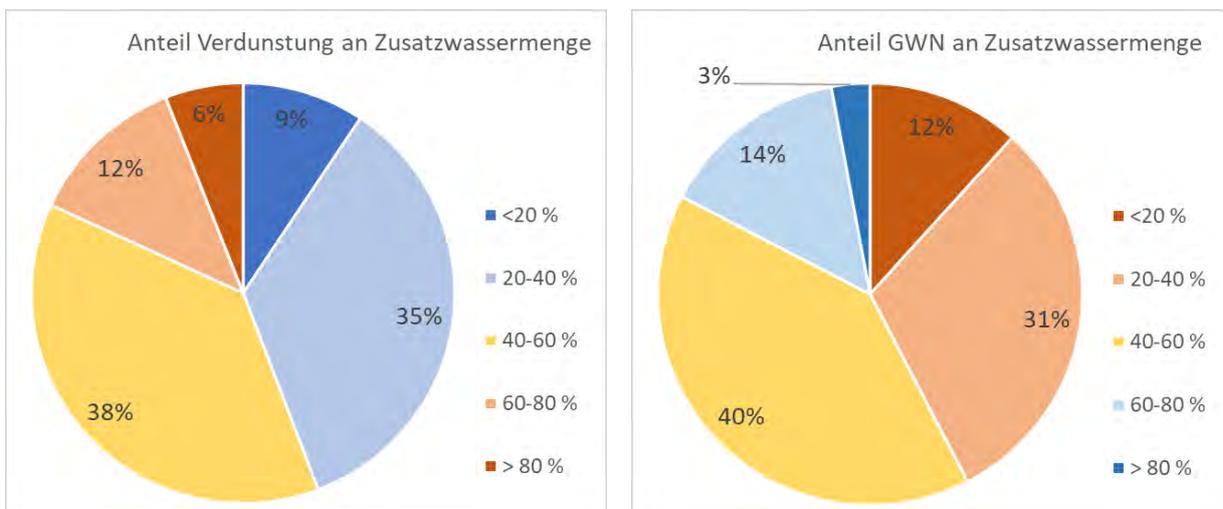


Abbildung 71: Klassifikation der Bewässerungsflächen hinsichtlich des Anteils von Verdunstungs- bzw. Sickerungsänderung an der Zusatzwassermenge

Betrachtet man die Auswirkungen der unterschiedlichen Bewässerungsszenarien auf den Grundwasserflurabstand GWFA (Abbildung 73 mit der Änderung unter B2 im Vergleich zu B1 in der Periode 2010-2019), so sind die unterschiedlichen Anteile von Verdunstung und Sickerwasserbildung an der Zusatzwassergabe auf den einzelnen Bewässerungsflächen räumlich begrenzt sichtbar. Deutlich prägen sich die Absenkrichter förderstarker Brunnen (hier Zunahme des GWFA) aus. Bei hohen Bewässerungsmengen und damit verbundenen Sickerwasserraten wird lokal eine geringe Abnahme des GWFA um bis zu 18 cm simuliert. Hier sollte geprüft werden, wo die hohen Fördermengen in der Realität des Szenarios B2 zur Beregnung eingesetzt werden würden.

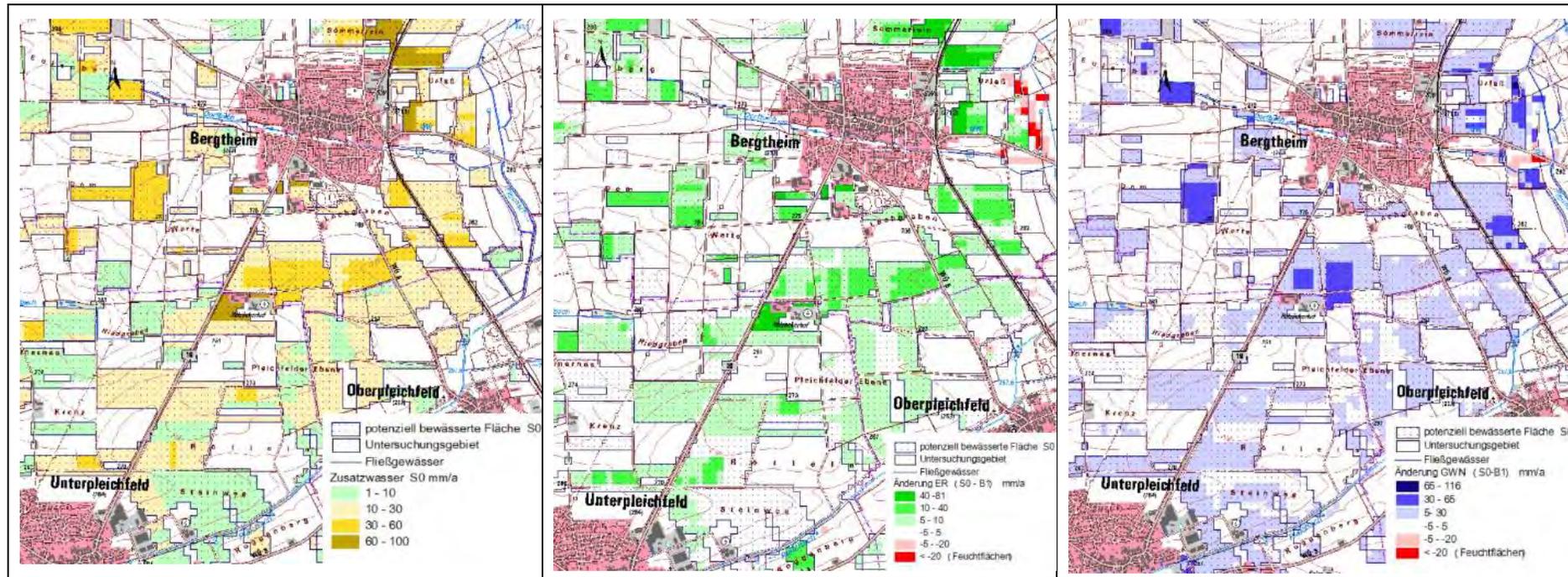


Abbildung 72: Zusatzwassergaben im Ist-Zustand S0 und Veränderung der Verdunstung und der Sickerwasserbildung gegenüber dem Szenario B1 (keine Bewässerung)

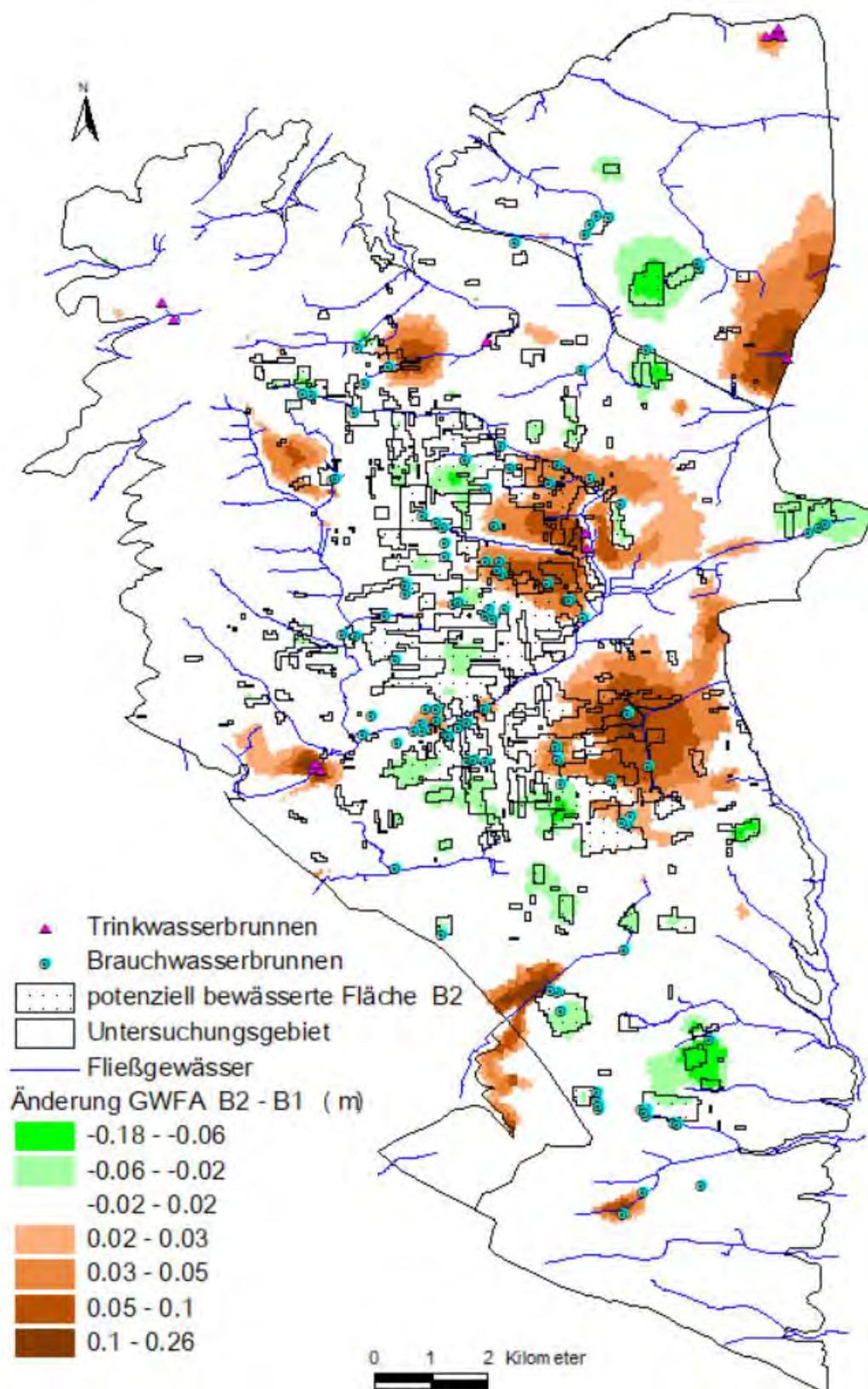


Abbildung 73: Änderung der Grundwasserflurabstände (GWFA) bei Bewässerung mit den genehmigten Mengen (Szenario B2) im Vergleich zum Szenario B1 (keine Entnahmen und Bewässerung), Periode 2010-2019

8.2.4 Änderung des Grundwasserhaushalts unter Szenariobedingungen

Die bedeutendste Größe für den Grundwasserhaushalt im Untersuchungsgebiet stellt die Grundwasserneubildung dar. Entsprechend wirken sich Änderungen hier am deutlichsten auf die Grundwasserbilanz aus. In Abbildung 74 sind Grundwasserbilanzkomponenten der einzelnen Szenariorechnungen für den Gesamtzeitraum 2005-2019 gegenübergestellt. Wie bereits aus der Gebietsbilanz ersichtlich, ergeben sich die größten Änderungen für die Szenarien mit veränderten Niederschlägen (S1-1, WS 2, erhöhte Niederschläge, S1-2, WS 1, verringerte Niederschläge).

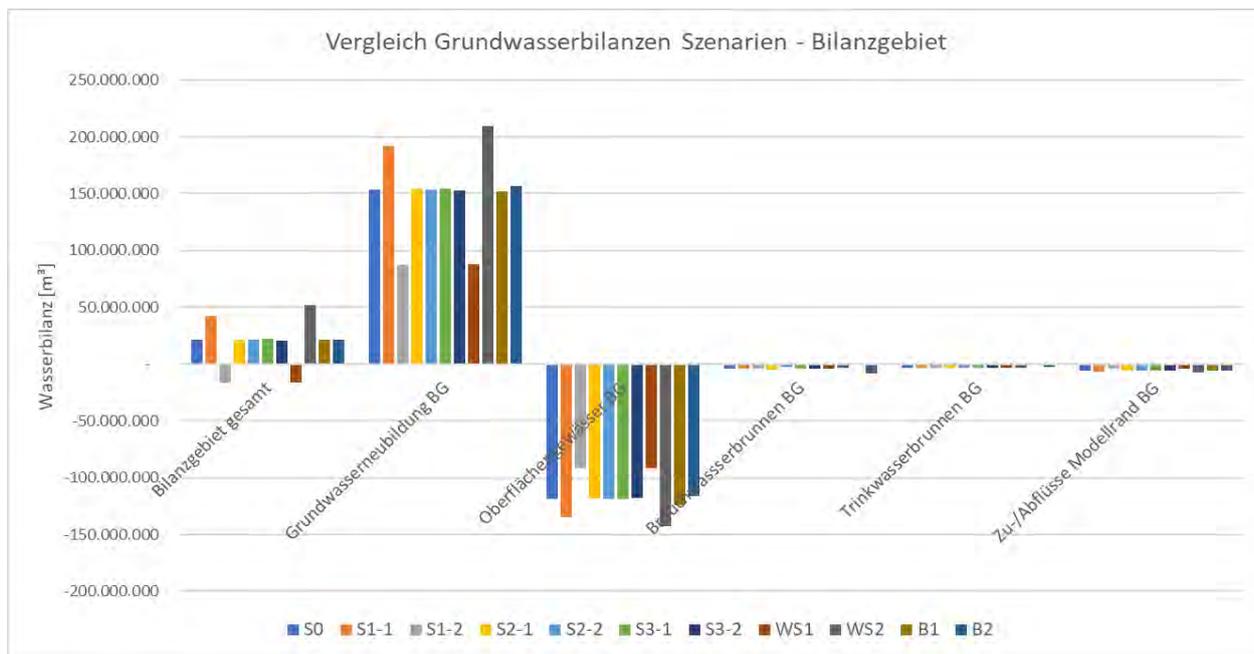


Abbildung 74: Grundwasserbilanz 2005-2019 Szenarienvergleich

Die einzelnen Komponenten des Grundwasserhaushalts sind in Tabelle 22 für die Szenarien bezogen auf die jeweilige Grundwasserneubildung dargestellt. Die im jeweiligen Szenario im Input veränderten Parameter sind grau hinterlegt.

Tabelle 22: Grundwasserhaushaltskomponenten Szenarien

Wasserbilanz in Mio m³/a	Szenario	Bilanzgebiet gesamt	Grundwasserneubildung	Oberflächengewässer	Brauchwasserbrunnen	Trinkwasserbrunnen	Zu-/Abflüsse Modellrand	Abfluss Oberer Muschelkalk
2005-2019	S0	22	154	-119	-4,0	-3,4	-6	-0,6
	S1-1	42	192	-135	-4,0	-3,4	-7	-0,6
	S1-2	-16	87	-91	-3,9	-3,4	-4	-0,6
	S2-1	22	155	-118	-5,2	-3,4	-6	-0,6
	S2-2	22	153	-119	-2,8	-3,4	-6	-0,6
	S3-1	22	155	-119	-4,0	-3,4	-6	-0,6
	S3-2	21	153	-118	-4,0	-3,4	-6	-0,6
	WS1	-16	87	-91	-4,3	-3,4	-4	-0,6
	WS2	52	210	-143	-3,6	-3,4	-8	-0,6
	B1	22	152	-124	0	0	-6	-0,6
B2	21	157	-116	-8,0	-3,0	-6	-0,6	

Es zeigt sich, dass die Änderungen in der Gesamtbilanz fast ausschließlich auf die Klimaszenarien (S 1-1, S1-2, WS1, WS2) beschränkt sind. Bei den Szenarien mit leicht veränderter Grundwasserneubildung (S 2-1, S2-2) sind die veränderten Entnahmen an den Brunnen erkennbar. Der völlige Verzicht auf eine Grundwasserentnahme (Szenario B1) und die Ausschöpfung der genehmigten Entnahmen (B2) wirkt sich sowohl auf den Abfluss über die Oberflächengewässer aus, als auch geringfügig in der Gesamtbilanz.

Tabelle 23: Grundwasserhaushaltskomponenten anteilig bezogen auf die Grundwasserneubildung (2005-2019)

Szenario	Bilanzgebiet gesamt	Grundwasserneubildung	Oberflächengewässer	Brunnen gesamt	(davon Trinkbrunnen)	Zu-/Abflüsse Modellrand	Abfluss oberer Muschelkalk
S0	14%	100%	-77%	-5%	(46%)	-4%	-0,4%
S1-1	22%	100%	-70%	-4%	(46%)	-3%	-0,3%
S1-2	-18%	100%	-105%	-8%	(47%)	-4%	-0,7%
S2-1	14%	100%	-76%	-6%	(40%)	-4%	-0,4%
S2-2	14%	100%	-78%	-4%	(55%)	-4%	-0,4%
S3-1	14%	100%	-77%	-5%	(46%)	-4%	-0,4%
S3-2	14%	100%	-77%	-5%	(46%)	-4%	-0,4%
WS1	-18%	100%	-104%	-9%	(45%)	-4%	-0,7%
WS2	25%	100%	-68%	-3%	(49%)	-4%	-0,3%
B1	14%	100%	-82%	0%	(0%)	-4%	-0,4%
B2	14%	100%	-74%	-7%	(27%)	-4%	-0,4%

8.2.5 Einfluss der Bewässerungswirtschaft auf Grundwasserbilanzen und Grundwasserstände

Wie bereits aus der Grundwasserbilanz (Kapitel 8.2.4) hervorgeht, spielen die Grundwasserentnahmen prozentual gesehen nur eine geringe Rolle. Der Einfluss der Bewässerungswirtschaft lässt sich daher am besten aus den beiden Extremszenarien „keine Grundwasserentnahme“, also Szenario B1 und „genehmigte Entnahmen“, also Szenario B2 ableiten. In nachstehender Tabelle 24 sind für diese Szenarien die Änderungen im Vergleich zum Szenario S0 aufgeführt. Für das Bilanzgebiet erhöhen sich die Entnahmen der Bewässerungsbrunnen im Szenario B2 im Vergleich zu den realen Entnahmen (S0) um ca. 100 %. Die Entnahmen der Trinkwasserbrunnen dagegen sinken sogar etwas, was mit der teilweisen Überschreitung der genehmigten Entnahmen im Realbetrieb zusammenhängt. Zudem sind sowohl einige Trink- als auch Brauchwasserbrunnen bis in den Oberen Muschelkalk verfiltert. Diese Mischverfilterung führt im Modell zu einem Zufluss zu diesen Brunnen über eine untere Randbedingung (vgl. 5.5.2.5), was zu einer Abweichung der im Modell aus dem Unteren Keuper entnommenen Wassermengen, von den real aus den Brunnen geförderten Wassermengen führt und auch den negativen Wert bei Szenario B1 in Tabelle 24 erklärt.

Deutlich wird bei der Betrachtung der Szenarien mit Extrementnahmen, dass sie sich auf nahezu alle Komponenten des Grundwasserhaushalts auswirken. Neben der Gesamtbilanz sind auch die Abflüsse über die Oberflächengewässer betroffen, wie auch im Kapitel 8.2.6 in Tabelle 25 erkennbar.

Tabelle 24: Änderung Grundwasserbilanzkomponenten im Vergleich zu Szenario S0

Szenario (2005-2019)	Bilanzgebiet gesamt	Grundwasserneubildung	Oberflächen-gewässer	Brunnen	Trinkw-Brunnen	Zu-/Ab-flüsse Modellrand	Abfluss oberer Mu-schelkalk
S0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
B1	101%	99%	105%	-4%	0%	102%	100%
B2	90%	100%	98%	200%	88%	99%	100%

Die Auswirkungen der Entnahmen auf die Wasserspiegel variieren je nach Lage der Beobachtungspunkte. An den 6 Doppelmessstellen sind die Veränderungen bei einem Verzicht auf Grundwasserentnahmen vor allem im kuW zu erkennen. Während sich an einigen Messstellen die Grundwasserspiegel nur über die entnahmereichen Sommermonate ändern (GWM 4-6), sind an den Messstellen GWM 1-3, welche näher zu entnahmereichen Brunnen und näher am Muldenzentrum gelegen sind, kontinuierlich höhere Wasserspiegel im kuW und gegen Ende der Simulation geringfügig auch im kuD zu erkennen, wenn keine Brunnen in Betrieb sind. Die Ganglinien der Doppelmessstellen für das Szenario B1 und S0 sind in Abbildung 75 dargestellt.



Abbildung 75: Ganglinien Doppelmessstellen Szenario B1 und S0

Beim Vergleich des Basisszenarios (S0) mit dem Szenario genehmigte Entnahmen (B2) zeigen sich Veränderungen der Ganglinien auch wieder in erster Linie im kuW (vgl. Abbildung 76). Dies liegt daran, dass die meisten Brunnen in der Region ihr Wasser aus dem Werksandstein beziehen, der zudem einen stark gespannten Zustand aufweist. Aufgrund geringerer Speicherkoeffizienten in gespannten Grundwasserleitern können sich die Absenktrichter (verursacht durch Grundwasserentnahmen) weiter ausbreiten als in ungespannten Aquiferen. Daher sind in bewässerungsstarken Monaten in der Bergtheimer Mulde die durch GW-Entnahme verursachten Absenkungstrichter auch an GWM und nicht bepumpten Brunnen deutlich erkennbar. Dabei gilt: Je stärker und näher die Entnahme, desto gravierender die Absenkung an der Messstelle. Je nachdem, ob die genehmigten Entnahmen an den nahe gelegenen Brunnen höher oder niedriger (ggf. durch andere Umverteilung des Wasserrechts auf mehrere Brunnen) ausfallen als im Basisszenario, verändern sich die Absenkungen in den Sommermonaten. Die Auswirkungen auf die Ruhewasserspiegel im Winter sind aber gering und am deutlichsten noch an GWM 1 kuD erkennbar.

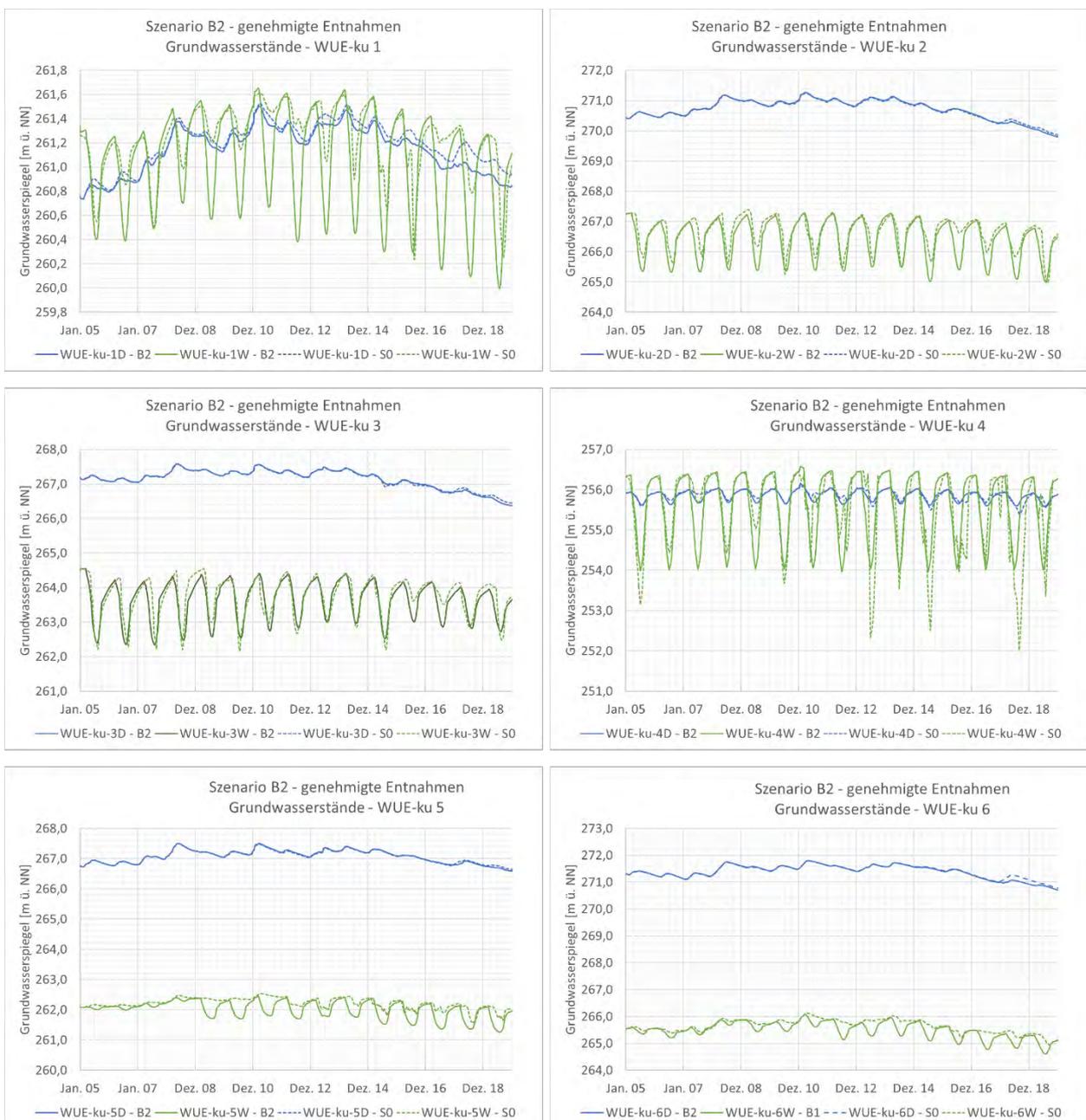


Abbildung 76: Ganglinien Doppelmessstellen Szenario B2 und S0

Über das gesamte Modellgebiet lässt sich der Einfluss der Bewässerungswirtschaft aus den Wasserspiegeldifferenzen der Szenarien S0 (reale Entnahmen) und B1 (ohne Entnahmen) ableiten. In Abbildung 77 sind die Differenzen der Wasserspiegel für den letzten Winter des Simulationszeitraums gegenübergestellt. Erkennbar sind hier vor allem die ganzjährigen Entnahmen an den Trinkwasserbrunnen (in der Grafik blau markiert), die sich großräumigen Absenkungen um mehrere Dezimeter bemerkbar machen. Im kuD betrifft das vor allem die Brunnen [redacted] im kuW die Brunnen [redacted] und die Brunnen der [redacted] ganz im Norden des Modellgebiets.

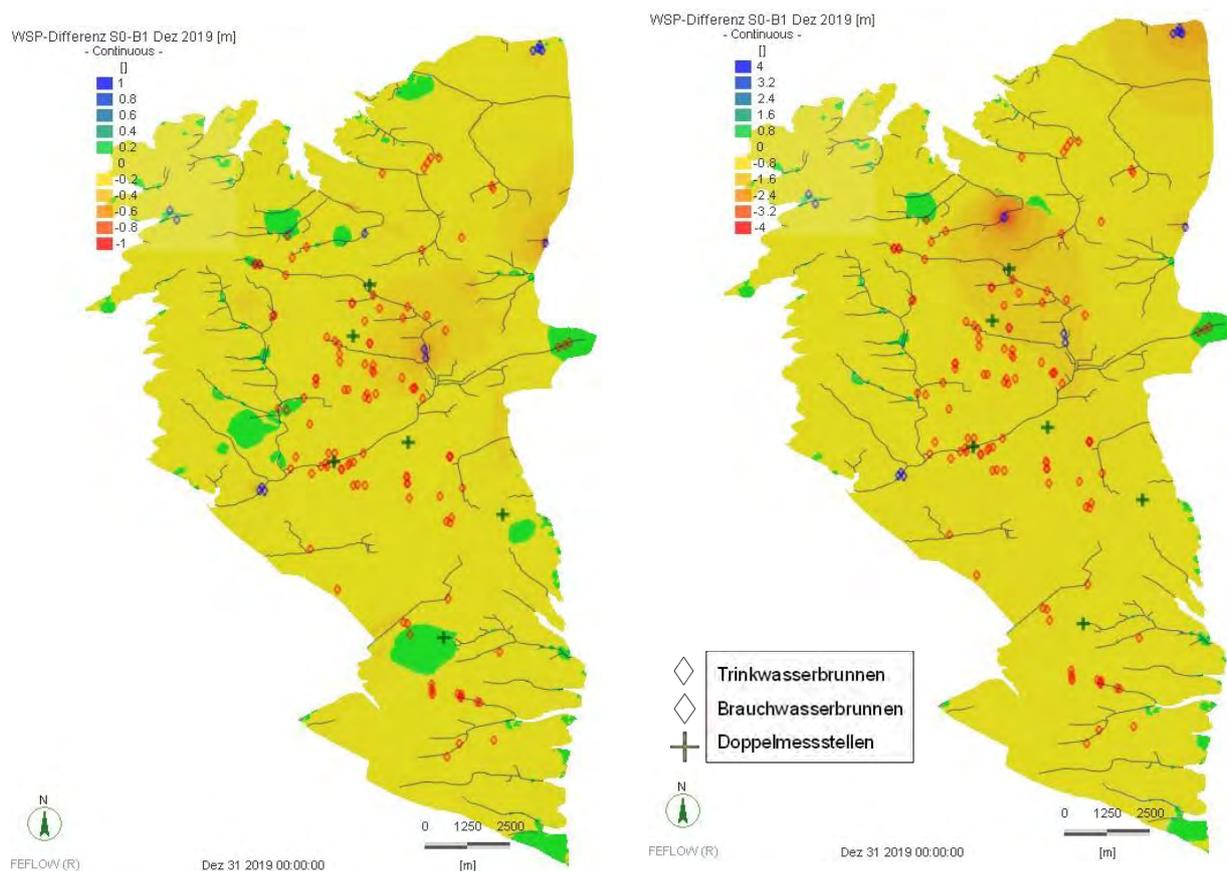


Abbildung 77: Differenz der Wasserspiegel zwischen Basisszenario S0 und Szenario B1 ohne GW-Entnahmen (Winter 2019), links kuD, rechts kuW

Beim Vergleich zu Szenarien S0 und B1 im letzten Sommer der Simulationsperiode (Juli 2019) zeigt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 78). Auch hier zeichnen sich die Entnahmen der großen Trinkwasserbrunnen am deutlichsten ab. Darüber hinaus sind v.a. im kuW auch die Absenkungen an den Bewässerungsbrunnen rund um Bergtheim und Unterpleichfeld mit großräumig mehreren Metern Absenkung gut erkennbar. Die dauerhaften Entnahmen an den Trinkwasserbrunnen wirken sich demnach wesentlich deutlicher auf die Grundwasserspiegel der Umgebung aus als die sommerlichen Entnahmen an den Bewässerungsbrunnen. Ein Vergleich der Szenarien B1 und B2 liegt digital in Anlage 5 bei.

Die Doppelmessstellen GWM WUE ku1, ku2 und ku3 liegen im Einflussbereich der Trinkwasserbrunnen Hausen und Bergtheim. Die aus den Ganglinien der Doppelmessstellen erkennbaren Wasserspiegeldifferenzen auch in den Wintermonaten (Abbildung 75) sind also zum großen Teil auf den Einfluss der Trinkwasserentnahmen zurückzuführen. Die Ausprägung der Absenkung um den Trinkwasserbrunnen Hausen erscheint sehr stark, und wird im Modell vermutlich überschätzt. Ob der Brunnen tatsächlich mehr Wasser aus dem unterlagernden Muschelkalk oder womöglich aus den, laut Ausbauplan, nicht erschlossenen Schichten oberhalb der Filterstrecke bezieht, ist unklar. In der betreffenden Region um Hausen liegen Stö-

rungszonen und es sind teils widersprüchliche Bohrprofile dokumentiert. Möglich sind daher auch geologische/tektonische Anomalien, die im Modell nicht erfasst sind, sich aber hydraulische auf den Brunnen auswirken.

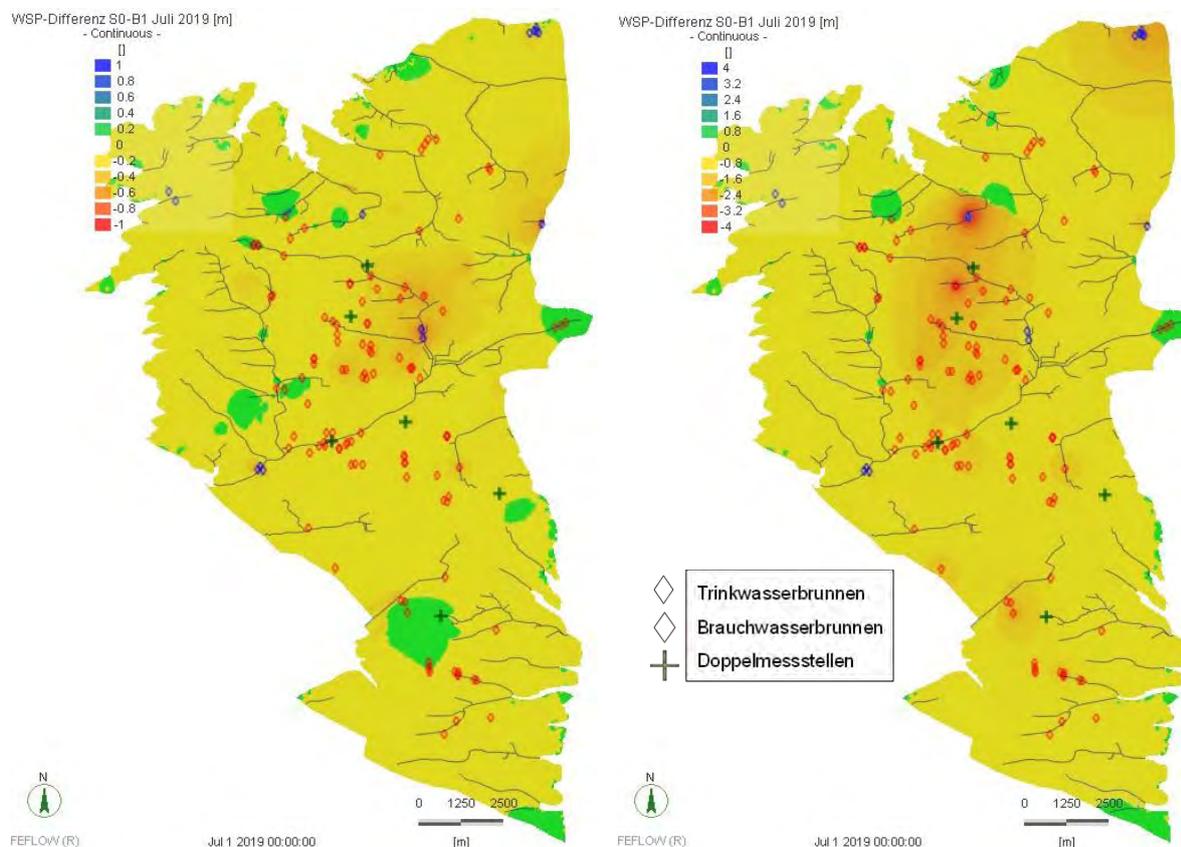


Abbildung 78: Differenz der Wasserspiegel zwischen Basisszenario S0 und Szenario B1 ohne GW-Entnahmen (Sommer 2019), links kuD, rechts kuW

8.2.6 Änderung der Gewässerabflüsse unter den Szenariobedingungen

Im Folgenden sind die gewässerkundlichen Hauptzahlen MQ (mittlerer Abfluss, Tabelle 25), MNQ (mittlerer Niedrigwasserabfluss, Tabelle 26) und MHQ (mittlerer Hochwasserabfluss, Tabelle 27) und deren prozentuale Veränderung gegenüber dem Ist-Zustand (S0) für alle Szenarien und Ausgabepunkte dargestellt. Je nach Lage der einzelnen Gewässerabschnitte sind die Wirkungen unterschiedlich. Jedoch zeigt sich auch bei den simulierten Gewässerdurchflüssen eine deutlich stärkere Reaktion gegenüber den simulierten Klimaveränderungen im Vergleich zur Änderung des Bewässerungsregimes.

Das wird bei der Darstellung der mittleren innerjährlichen Abflussdynamik ausgewählter Ausgabepunkte und Szenarien besonders anschaulich. Im Ist-Zustand wird an allen Ausgabepunkten im Januar ein teilweise doppelgipfliges Abflusshoch (Schneesmelze) simuliert. Entsprechend des kurzen Zeitraumes von 15 Jahren prägt sich hier das simulierte Extremhochwasser im Januar 2011 durch (s. Kap.6.4.3). Dieses verschwindet bei einer Temperaturerhöhung um 1,5 °C (S1-1, S1-2, WS1) fast komplett. Dafür verstärken sich die Abflussspitzen im Dezember (Abbildung 79).

Insgesamt ist ein deutlicher Unterschied im mittleren Abflussgeschehen zwischen S0 und den Szenarien Nass- (WS2) und Trockenjahre (WS1) festzustellen. Die Unterschiede zwischen keiner Bewässerung (B1) und Maximalbewässerung (B2) sind bei gleichen klimatischen Bedingungen deutlich geringer und je nach Lage nur bei einzelnen Gewässerabschnitten (z.B. Pegel Pleichach-Mühlhausen, 163) deutlich erkennbar (Abbildung 80).

Tabelle 25: Simulierte MQ (mittlerer Durchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MQ)

FGWID	Name	MQ [l/s]										
		S0	S1-1	S1-2	S2-1	S2-2	S3-1	S3-2	B1	B2	WS1	WS2
53	P Schernauer Bach - Mühle	51,2	58,6	41,4	51,2	51,2	51,4	51,2	51,4	51,1	41,4	60,5
79	A3 Pleichach Fährbrück	3,8	5,1	2,1	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	3,9	2,1	5,5
93	A1 Pleichach Bergtheim	21,9	29,5	12,7	21,9	21,8	21,9	21,8	23,2	21,8	12,7	32,1
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld	180	213	135	179	181	180	179	186	178	135	224
159	A4 Grumbach Burggrumbach	100	118	73	100	100	100	100	101	100	73	125
163	P Pleichach Mühlhausen	314	372	234	313	315	315	313	325	311	234	391
190	P Kürnach	45,3	52,5	34,7	45,3	45,3	45,3	45,2	45,5	45,1	34,7	55,1
266	A5 Brumbach Essleben	39,1	48,8	24,9	39,0	39,2	39,4	39,0	39,8	39,1	24,9	51,7

		D% MQ [%]										
53	P Schernauer Bach - Mühle		14,5	-19,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	-0,2	-19,1	18,2
79	A3 Pleichach Fährbrück		35,0	-43,2	0,0	-0,3	0,5	-0,3	-0,8	2,1	-43,2	45,6
93	A1 Pleichach Bergtheim		34,7	-42,0	0,0	-0,5	0,0	-0,5	5,9	-0,5	-42,0	46,6
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld		18,3	-25,0	-0,6	0,6	0,0	-0,6	3,3	-1,1	-25,0	24,4
159	A4 Grumbach Burggrumbach		18,0	-27,0	-0,4	0,0	0,0	-0,2	1,0	-0,1	-27,1	25,0
163	P Pleichach Mühlhausen		18,5	-25,5	-0,3	0,3	0,3	-0,3	3,5	-1,0	-25,5	24,5
190	P Kürnach		15,9	-23,4	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,4	-0,4	-23,4	21,6
266	A5 Brumbach Essleben		24,8	-36,3	-0,3	0,3	0,8	-0,3	1,8	0,0	-36,3	32,2

Tabelle 26: Simulierte MNQ (mittlerer Niedrigwasserdurchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MNQ)

FGWID	Name	MNQ [l/s]										
		S0	S1-1	S1-2	S2-1	S2-2	S3-1	S3-2	B1	B2	WS1	WS2
53	P Schernauer Bach - Mühle	35,8	40,0	29,4	35,7	35,8	36,0	35,7	36,0	35,5	29,4	41,2
79	A3 Pleichach Fährbrück	0,003	0,003	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,005
93	A1 Pleichach Bergtheim	1,6	2,2	0,5	2,1	2,2	1,6	1,5	2,6	1,6	0,6	3,7
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld	90,2	100,0	71,6	88,6	92,5	90,2	89,3	98,1	86,0	71,0	106,0
159	A4 Grumbach Burggrumbach	45,0	54,7	32,2	43,4	45,1	46,3	46,0	47,8	46,0	32,0	58,4
163	P Pleichach Mühlhausen	152	173	115	149	155	153	152	166	146	114	184
190	P Kürnach	26,6	30,1	20,1	26,5	26,6	26,6	26,5	26,8	26,1	20,0	32,0
266	A5 Brumbach Essleben	20,5	25,3	12,0	20,3	20,6	20,6	20,4	21,2	20,0	12,0	27,1

		D% MNQ [%]										
53	P Schernauer Bach - Mühle		11,7	-17,9	-0,3	0,0	0,6	-0,3	0,6	-0,8	-17,9	15,1
79	A3 Pleichach Fährbrück		24,0	-47,2	-10,3	-10,3	0,0	-26,2	-55,4	-18,5	-63,1	68,6
93	A1 Pleichach Bergtheim		34,1	-67,9	25,0	36,6	0,0	-7,3	59,8	-2,4	-62,3	124,4
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld		10,9	-20,6	-1,8	2,5	0,0	-1,0	8,8	-4,7	-21,3	17,5
159	A4 Grumbach Burggrumbach		21,6	-28,4	-3,6	0,2	2,9	2,2	6,2	2,2	-28,9	29,8
163	P Pleichach Mühlhausen		13,8	-24,3	-2,0	2,0	0,7	0,0	9,2	-3,9	-25,0	21,1
190	P Kürnach		13,2	-24,4	-0,4	0,0	0,0	-0,4	0,8	-1,9	-24,8	20,3
266	A5 Brumbach Essleben		23,4	-41,5	-1,0	0,5	0,5	-0,5	3,4	-2,4	-41,5	32,2

Tabelle 27: Simulierte MHQ (mittlerer Hochwasserdurchfluss) [l/s] 1.1.2005-31.12.2019 für die Szenarien und relative Abweichung zu S0 (D% MHQ)

FGWID	Name	MHQ [l/s]										
		S0	S1-1	S1-2	S2-1	S2-2	S3-1	S3-2	B1	B2	WS1	WS2
53	P Schernauer Bach - Mühle	381	341	148	381	381	381	381	379	380	148	458
79	A3 Pleichach Fährbrück	144	143	52	144	144	145	144	144	145	52	204
93	A1 Pleichach Bergtheim	586	594	254	587	585	590	582	584	594	254	867
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld	1910	2210	993	1910	1910	1920	1900	1900	1940	993	2860
159	A4 Grumbach Burggrumbach	974	1090	535	973	973	975	972	973	980	535	1390
163	P Pleichach Mühlhausen	3100	3630	1670	3100	3100	3110	3090	3100	3140	1670	4570
190	P Kürnach	483	455	269	483	483	483	483	483	483	269	553
266	A5 Brumbach Essleben	375	418	198	376	375	378	375	375	378	198	522

		D% MHQ [%]										
53	P Schernauer Bach - Mühle		-10,5	-61,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,5	-0,3	-61,2	20,2
79	A3 Pleichach Fährbrück		-0,7	-63,9	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,7	-63,8	41,7
93	A1 Pleichach Bergtheim		1,4	-56,7	0,2	-0,2	0,7	-0,7	-0,3	1,4	-56,7	48,0
117	A2 Pleichach Unterpleichfeld		15,7	-48,0	0,0	0,0	0,5	-0,5	-0,5	1,6	-48,0	49,7
159	A4 Grumbach Burggrumbach		11,9	-45,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	0,6	-45,1	42,7
163	P Pleichach Mühlhausen		17,1	-46,1	0,0	0,0	0,3	-0,3	0,0	1,3	-46,1	47,4
190	P Kürnach		-5,8	-44,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-44,3	14,5
266	A5 Brumbach Essleben		11,5	-47,2	0,3	0,0	0,8	0,0	0,0	0,8	-47,2	39,2

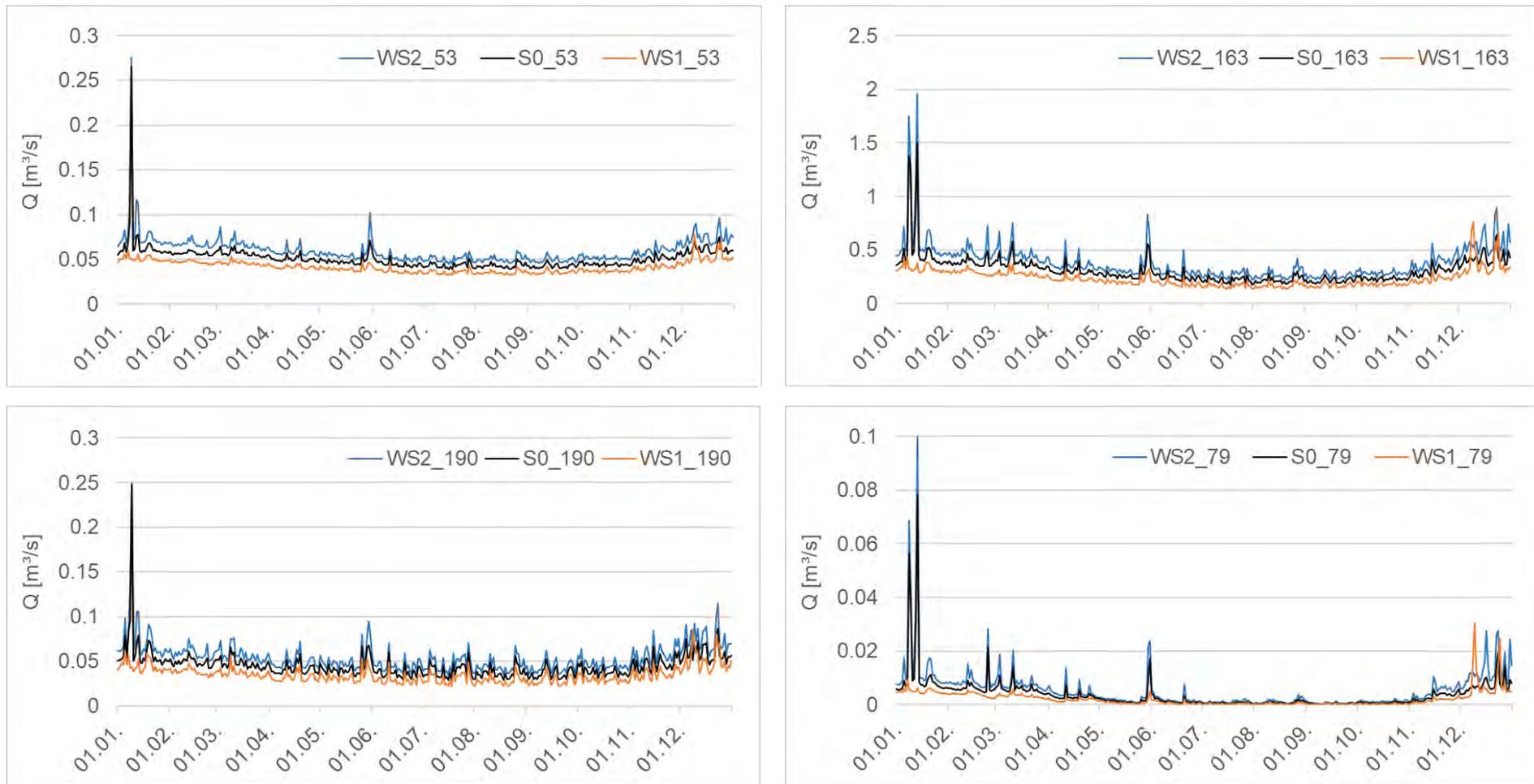


Abbildung 79: Mittlerer Jahrgang (2005-2019) der Abflüsse an den Pegeln Schernauer Bach – Mühle (53), Pleichach Mühlhausen (163), Kürnach (190) und dem Kontrollpunkt Pleichach Fährbrück (79) für den Ist-Zustand (S0) und den Szenarien Trockenjahr (WS1) und Nassjahr (WS2)

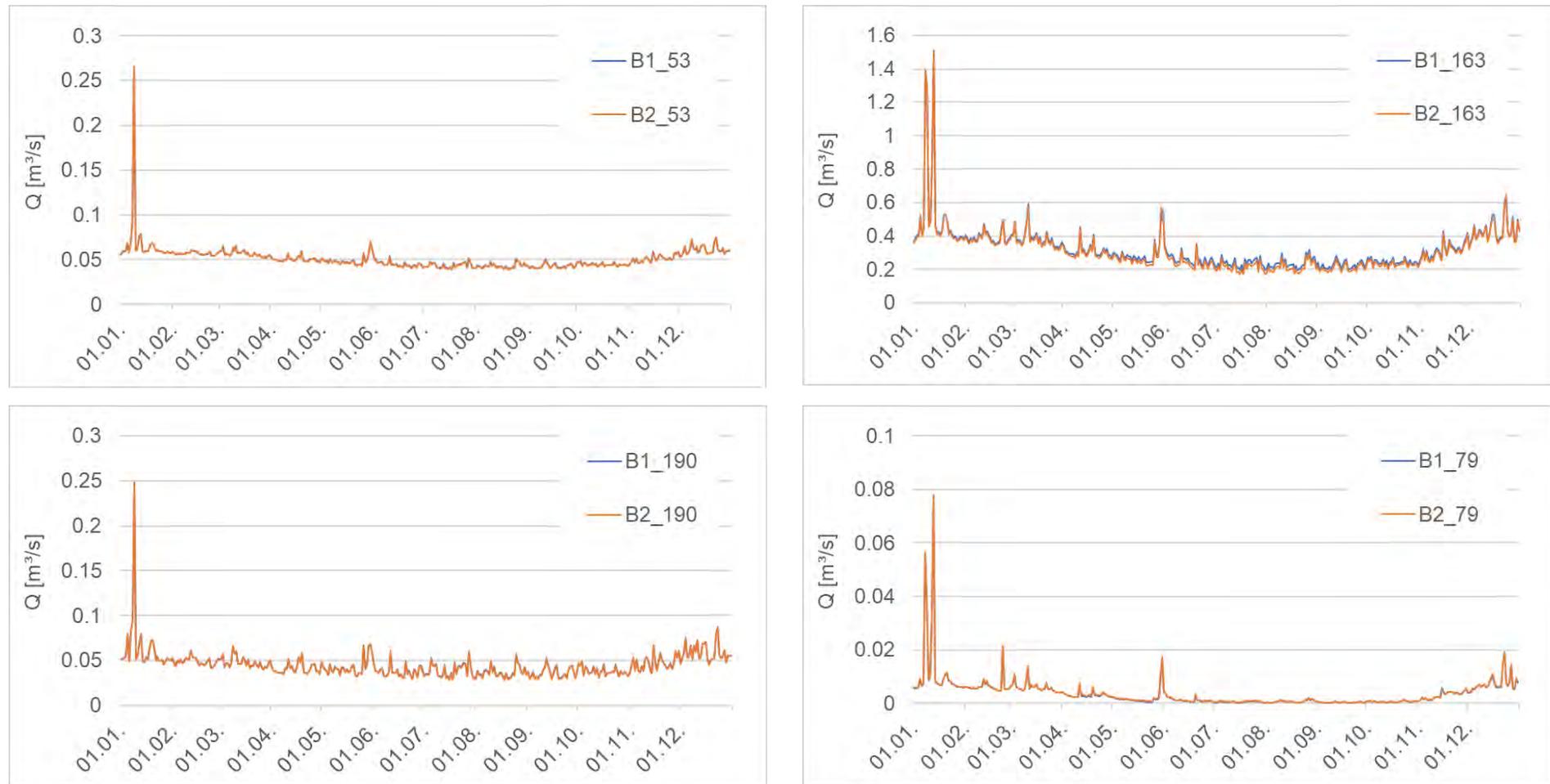


Abbildung 80: Mittlerer Jahrgang (2005-2019) der Abflüsse an den Pegeln Schernauer Bach – Mühle (53), Pleichach Mühlhausen (163), Kürnach (190) und dem Kontrollpunkt Pleichach Fährbrück (79) ohne Bewässerung (B1) und mit genehmigter Bewässerung (B2)

8.2.7 Änderung der Grundwasserspiegel

Die Änderung der Grundwasserspiegel für die unterschiedlichen Szenarienberechnungen im Vergleich zu Ausgangsszenario S0 werden sowohl für die Doppelmessstellen und Beobachtungspunkte, sowie flächendifferenziert für das Gesamtgebiet untersucht. Die betreffenden Messstellen sind in Abbildung 81 zur Orientierung räumlich abgebildet.

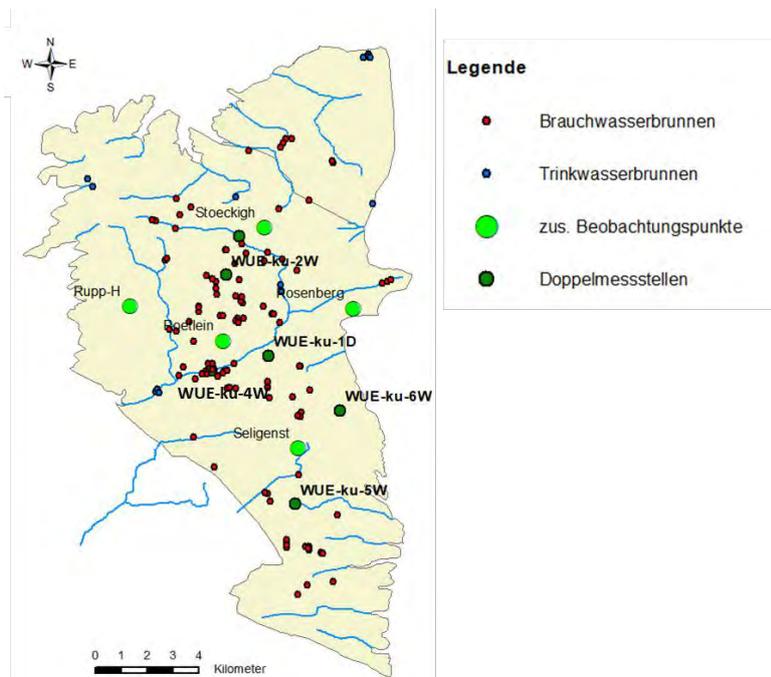


Abbildung 81: Lage der Messstellen und Beobachtungspunkte

Die Ganglinien der Doppelmessstellen und Beobachtungspunkte sind in Anlage 4.4 für jedes Szenario jeweils im Vergleich zum Basisszenario S0 dargestellt. Hier im Text ist exemplarisch jeweils die Doppelmessstelle GWM 2 abgebildet. Die bereits in Kapitel 8.2.5 behandelten Szenarien B1 und B2 sind hier nicht mehr diskutiert.

Die größte Veränderung der Wasserspiegel im Vergleich zum Basisszenario S0 ergeben sich bei den klimabeeinflussten Szenarien (S1, WS), bei denen jeweils die Niederschläge um 10% verändert wurden. Sowohl im kuD als auch im kuW zeigt sich mit zunehmender Simulationsdauer eine deutliche Abweichung der Grundwasserstände.

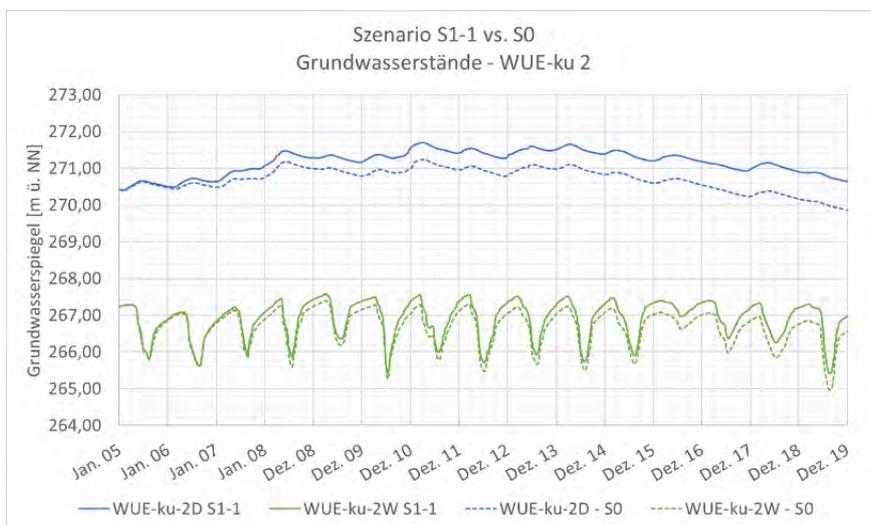


Abbildung 82: Ganglinien Szenario S0 und S1-1

Die hier dargestellten Ganglinien der GWM 2 für das Szenario S1 entsprechen nahezu denen für das Szenario WS, bei welchem ebenfalls die Niederschläge um 10% verringert, bzw. erhöht wurden. Die vollständigen Ganglinien für die Szenarien sind in Anlage 4.4 einzusehen. Auf eine Darstellung der Grundwasserspiegelveränderungen für Szenario WS 1 und WS 2 wird aufgrund der starken Ähnlichkeit zu den Szenarien S1-1 und S1-2 hier verzichtet.

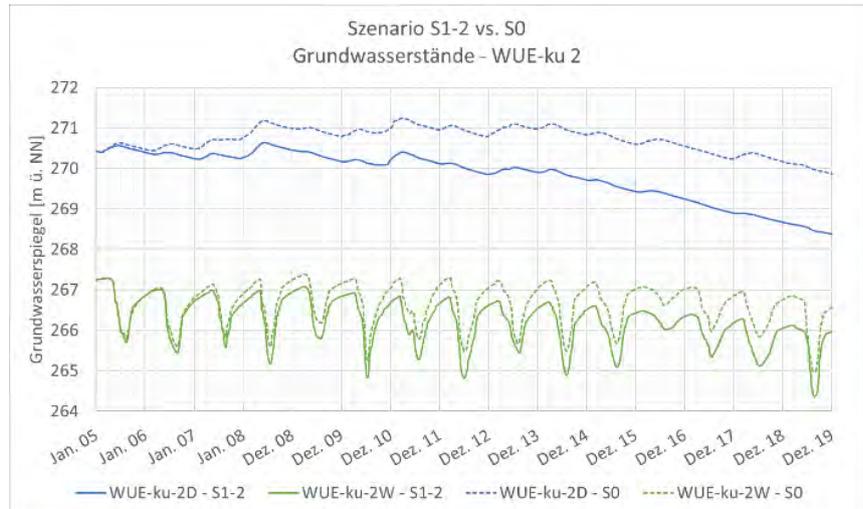


Abbildung 83: Ganglinien Szenario S0 und S1-2

In der Fläche betrachtet ergeben sich für das Ende des Simulationszeitraums die größten Abweichungen der Wasserspiegel von Basisszenario S0. Bei einer Erhöhung der Niederschläge (Szenario S1-1) erhöhen sich vor allem die Wasserspiegel der höher gelegenen Bereiche des Modellraum im Gramschatzer Wald sowie im Südosten des Modellgebiets (Abbildung 84). Der kuD reagiert hier stärker als der kuW.

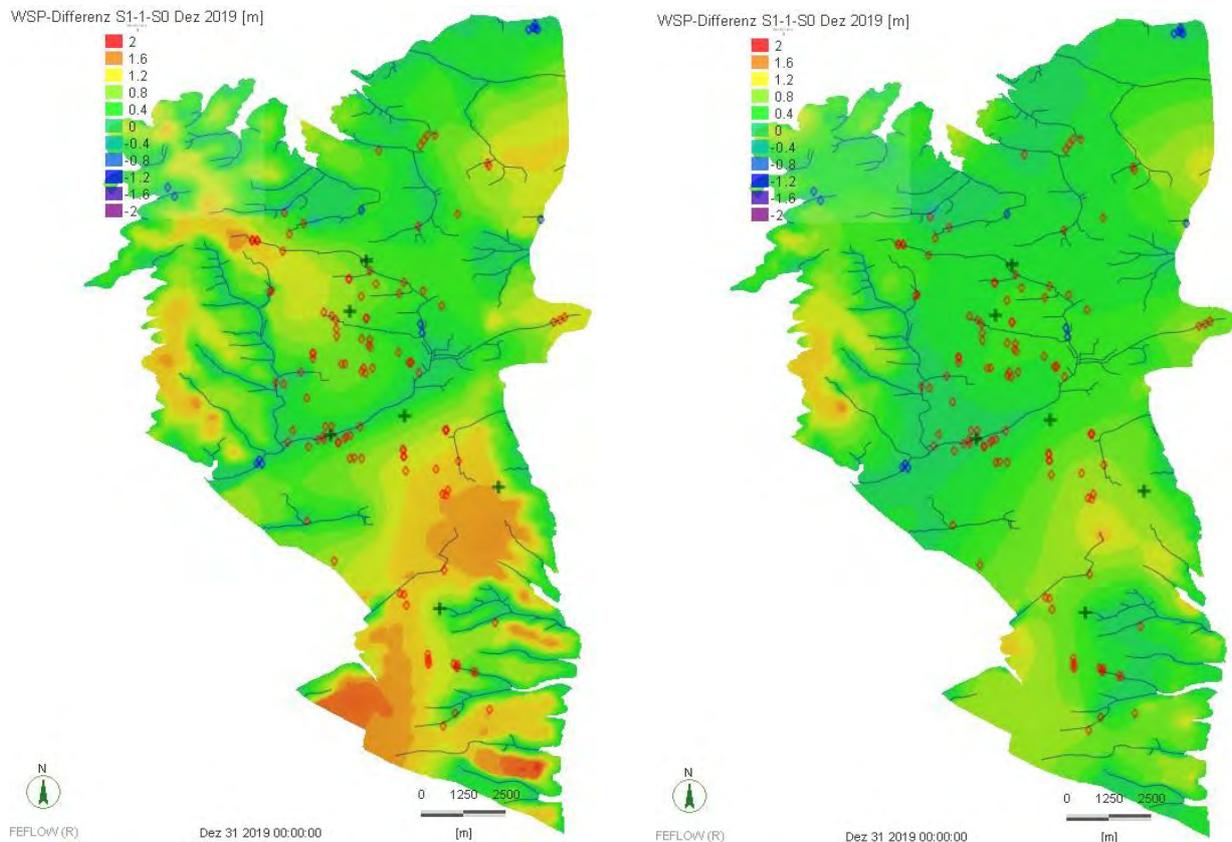


Abbildung 84: Abweichung der Wasserspiegel für das Szenario S 1-1 vom Basisszenario S0 (Dez 2019), links kuD, rechts kuW

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 (Abbildung 85).

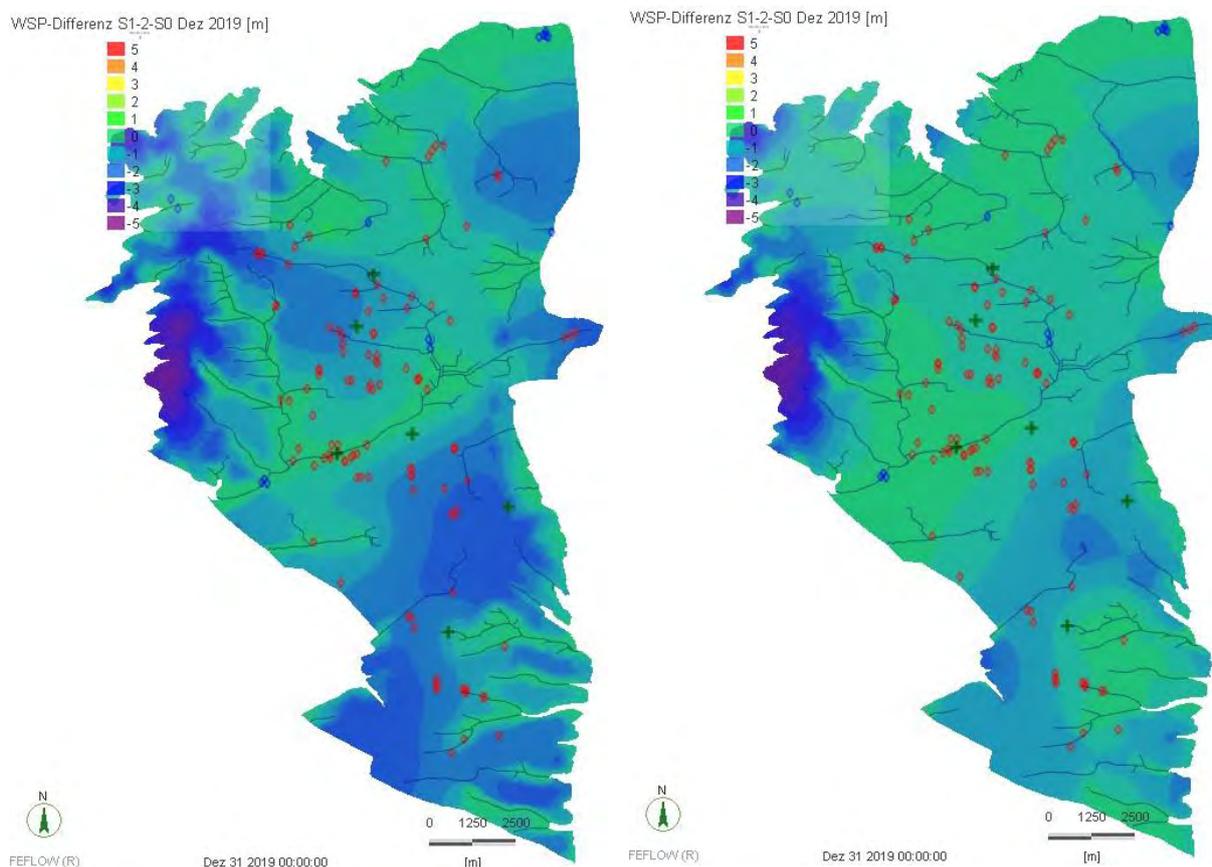


Abbildung 85: Abweichung der Wasserspiegel für das Szenario S 1-2 vom Basisszenario S0 (Dez 2019), links kuD, rechts kuW

Die Szenarien zur Entnahmeänderung S2-1 und S 2-2 mit einer Erhöhung bzw. Verringerung der Entnahmen um 30% zeigen im Vergleich zu den Klimaszenarien weit geringere Veränderungen bei den Grundwasserspiegeln. Exemplarisch ist wieder die Ganglinie für GWM 2 dargestellt. Abweichungen zum Szenario S0 sind hier nur während des Sommers im kuW sichtbar. Für die weiteren Ganglinien, die dieselbe Tendenz zeigen, wird auf Anlage 4.4 verwiesen.

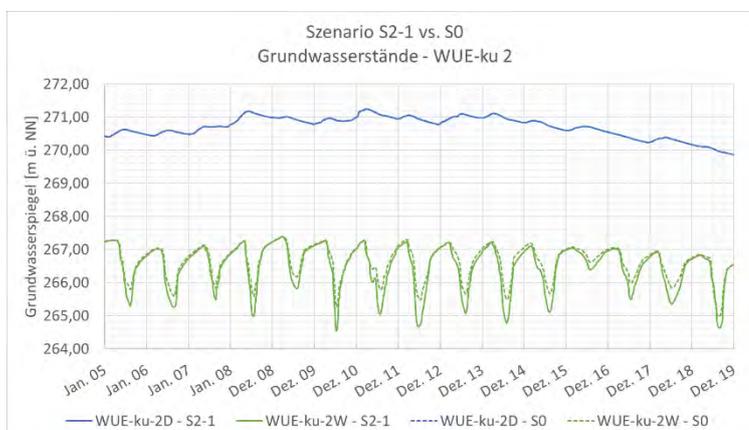


Abbildung 86: Ganglinien Szenario S0 und S2-1

Über die Fläche sind die Abweichungen der Wasserspiegel minimal und liegen, abgesehen von lokal erhöhten/verringerten Absenkungen an den Entnahmebrunnen im Sommer, zum Ende des Simulationszeitraums bei wenigen Zentimetern bis zu 20 cm (Abbildung 87).

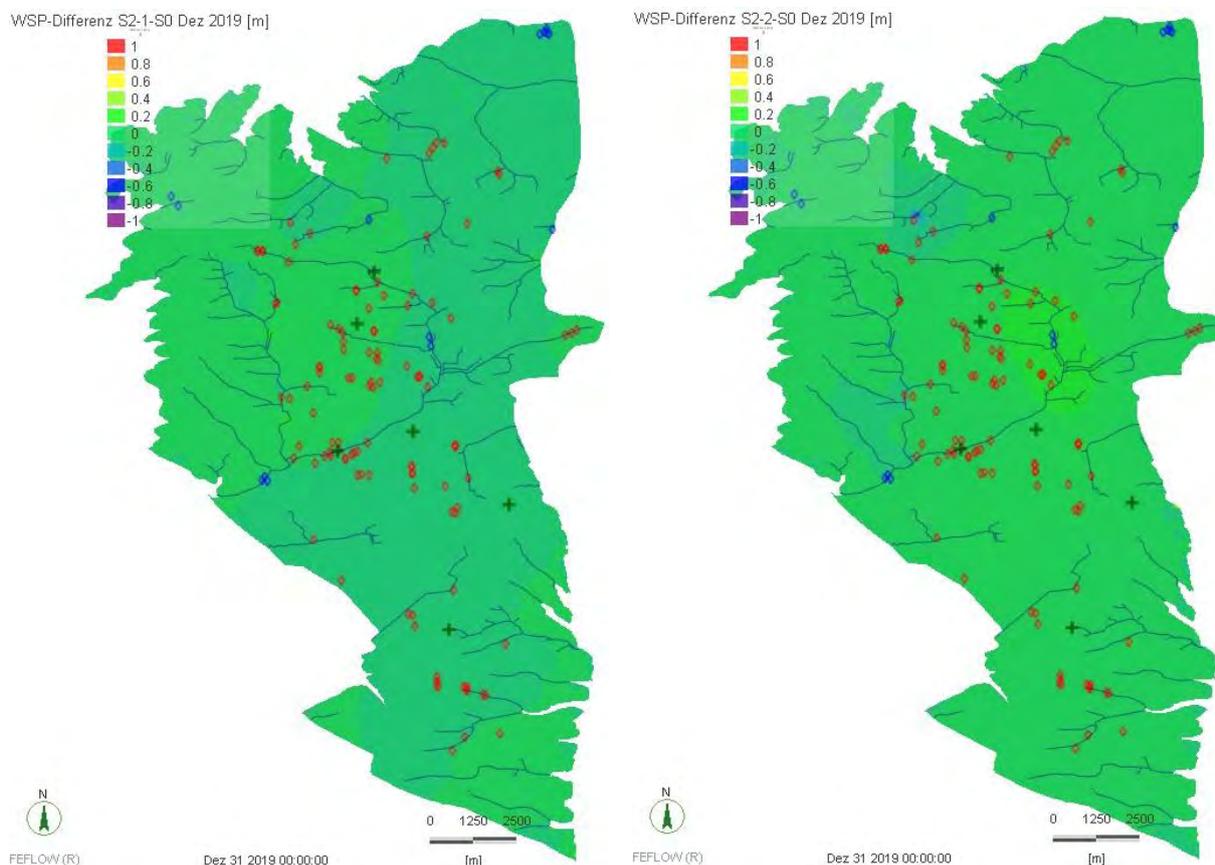


Abbildung 87: Abweichung der Wasserspiegel im kuW für das Szenario S 2-1 (links) und S 2-2 (rechts) vom Basisszenario S0 (Dez 2019)

Für das Szenario 3 ändern sich die Wasserspiegel im Vergleich zum Basisszenario allenfalls minimal. Exemplarisch ist hier die Ganglinie an GWM 2 für das Szenario S 3-1 abgebildet (Abbildung 88), für die übrigen Darstellungen wird auf die Anlage 4.4 verwiesen.

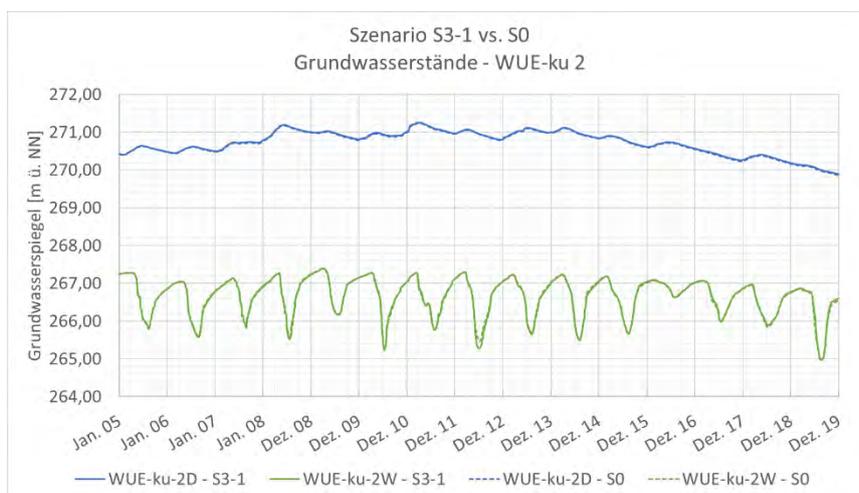


Abbildung 88: Ganglinien Szenario S0 und S3-1

8.3 Analysen zur Bilanzierung des Grundwassers im Unteren Keuper

Im Zentrum der Modellierung steht die Beantwortung von Fragen zur Wasserbilanz in der Bergtheimer Mulde und Konsequenzen für die künftige Bewirtschaftung.

Nach Auswertung der Modellergebnisse lassen sich die Fragen wie folgt beantworten.

- **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?**

Im Modellierungszeitraum schwankt die jährliche Grundwasserneubildung deutlich. Besonders hohe Werte zeigen sich in den Jahren 2007, 2008, 2010 und 2013. Besonders niedrig fällt die Grundwasserneubildung in den Jahren 2009, 2012 und 2014-2019 aus.

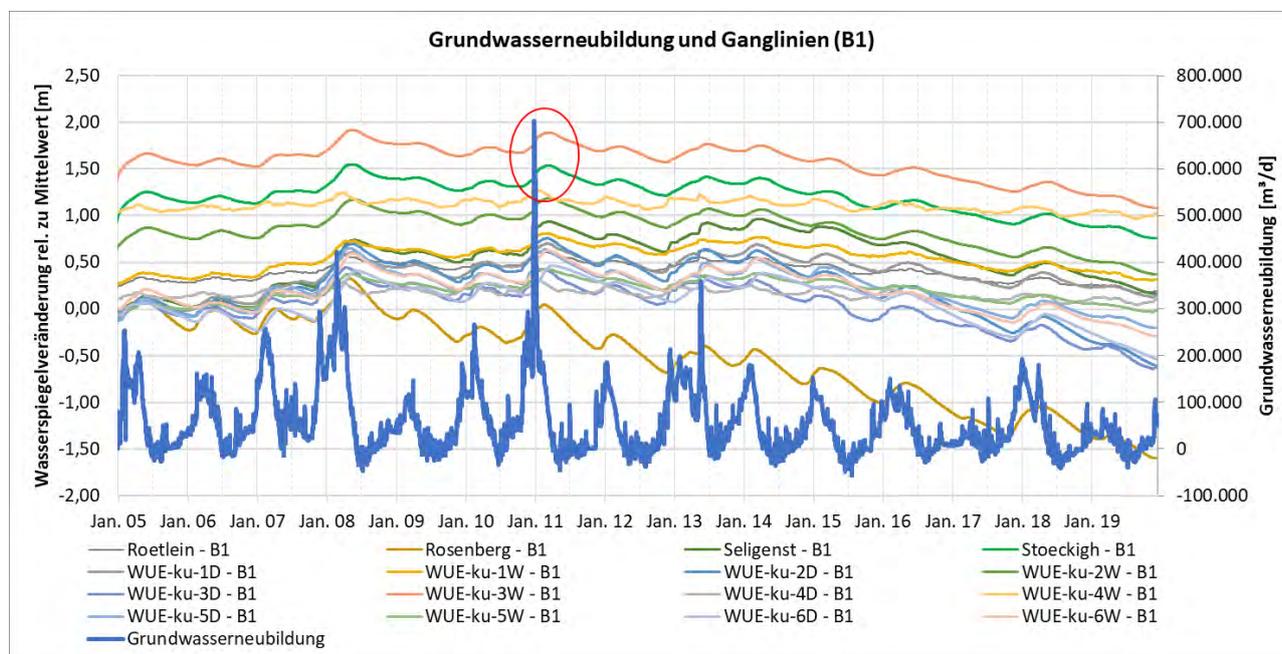


Abbildung 89: Reaktion der Grundwasserleiter auf veränderte Neubildungsraten

Die klimatischen Änderungen machen sich unterschiedlich schnell im Unteren Keuper bemerkbar. Am besten erkennbar sind die Reaktionen im Szenario ohne Entnahmen (B1). Hier pausen sich die Jahre mit geringer Grundwasserneubildung (2009, 2012) sowie mit hoher Grundwasserneubildung (2007, 2010) mit einer Verzögerung von rund 1/4 Jahr auf die Grundwasserspiegel durch.

Die im Modell nur bedingt abbildbare, an einigen Doppelmessstellen beobachtete Dynamik der Wasserspiegel, wie sie z.B. in GWM 1 und 2 im kuD erkennbar sind, zeigen, dass in einigen Bereichen Klimasignale noch schneller in den (oberen) Grundwasserleitern ankommen (vgl. Abbildung 90) Starke Niederschlagsereignisse kommen hier bereits nach wenigen Tagen im Grundwasserleiter an.

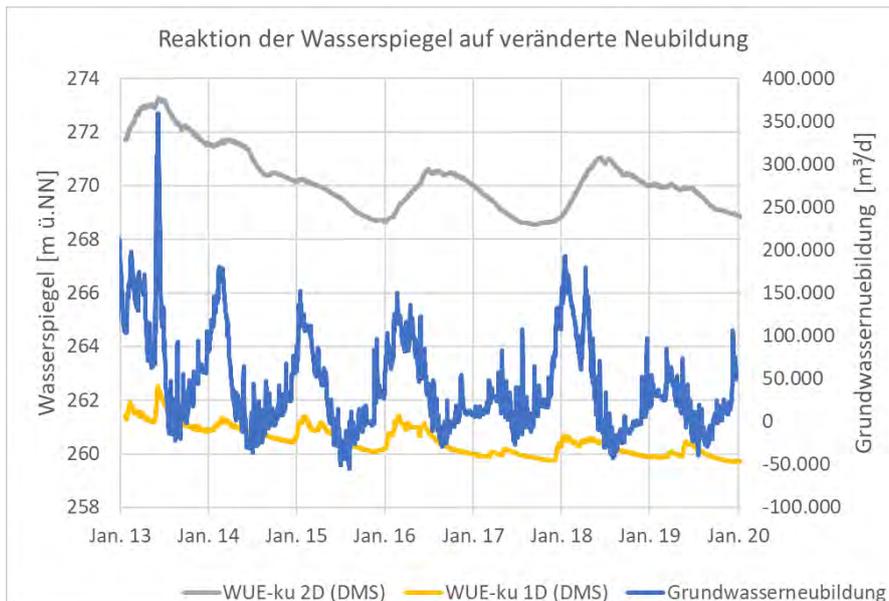


Abbildung 90: Vergleich der mittels Druckmesssonde (DMS) gemessenen Wasserspiegelschwankungen im kuD an GWM 1 (WUE-ku 1D) und GWM 2 (WUE-ku 1D) mit der berechneten Grundwasserneubildung

- **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?**

Die sinkenden Grundwasserspiegel sind im Wesentlichen durch klimatische Änderungen verursacht. Der Beitrag der Grundwasserentnahmen lässt sich aus dem Szenario B1 „ohne Entnahmen“ ableiten.

Über das Modell- und Bilanzgebiet zeigt sich zwischen 2005 und 2019 eine mittlere Wasserspiegelabsenkung von 2,92 m bzw. 0,34 m (Differenz B1, Jan 2005-Dez 2019). Beim Vergleich zwischen Szenario S0 und B1 im Dezember 2019 liegt die entnahmebedingte Differenz für das Modellgebiet nur bei 1,5 cm und für das Bilanzgebiet unter 1 cm. Regional betrachtet liegt der Anteil der Grundwasserentnahmen an der Absenkung bei knapp 2 % für das Bilanzgebiet und unter 1% für das Modellgebiet (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Anteil der entnahmebedingten Wasserspiegelabsenkung

	Mittlere Wasserspiegel [m ü. NN]				Differenz der mittleren Wasserspiegel [m]	
	Jan 05	S0 Dez 19	B1 Dez 19	B2 Dez 19	Klimabedingt (S0: Dez 2019-Jan 05)	Entnahmebedingt (S0-B1/B2-B1, Dez 19)
Bilanz- gebiet						
gesamt	340,89	340,55	340,55	340,55	-0,34	-0,01 / -0,01
kuD	340,89	340,54	340,55	340,54	-0,34	0,00 / 0,00
kuW	340,89	340,54	340,55	340,54	-0,34	0,00 / 0,00
Modell- gebiet						
gesamt	354,48	351,55	351,56	351,55	-2,92	-0,01 / -0,01
kuD	352,81	349,97	349,99	349,97	-2,82	-0,02 / -0,01
kuW	351,96	349,19	349,21	349,20	-2,75	-0,02 / -0,01

Da hinsichtlich der im Modell verwendeten "tatsächlichen Entnahmemengen" (S0) gerade für die frühen Jahre des Modellierungszeitraums erhebliche Datenlücken bestehen und kleinere Entnahmebrunnen nicht berücksichtigt sind, sollte für die Beantwortung dieser Frage auch das Szenario B2 (genehmigte Entnahmen) und dessen Auswirkungen auf die Grundwasserstände mitbetrachtet werden. Hier weicht die entnahmebedingte Differenz aber nur um wenige mm vom Szenario B1 ab. Während im Basisszenario S0 die tatsächlichen Brauchwasserentnahmen (und damit deren Auswirkungen) vermutlich leicht unterschätzt sind, werden die genehmigten Entnahmemengen im Durchschnitt nicht ausgeschöpft. In den Wintermonaten (Vergleichszeitraum Ende Dez 2019) spielen aber die Brauchwasserentnahmen eine untergeordnete Rolle. Die auch im Winter betriebenen Trinkwasserbrunnen schöpfen ihre genehmigten Entnahmen weitgehend aus, in einzelnen Jahren kommt es auch zu Überschreitungen der genehmigten Mengen.

Als Indikator wurden außerdem die mittleren jährlichen Wasserspiegel im Winterhalbjahr (Nov-April) der Messstellen (GWM WUE ku 1-6, WUE MU11) und der 5 Beobachtungspunkte (Rosenberg, Rupp, Rötlein, Seligenstadt, Stöckinghausen) für die Szenarien B1 und S0 im Vergleich zum jeweiligen Mittelwert 2005 (S0) aufgetragen. Für beide Szenarien zeigen sich seit etwa 2014 sinkende Grundwasserspiegel. Während die Differenz mit und ohne Entnahmen aber im kuD minimal ist, liegen die Differenzen im kuW bei 30-40 cm (Abbildung 91) und damit zwischen 30% und 50% des klimatischen Effekts (Absenkung 2014-2019).

Die Messstellen sind zwar nicht für das Gebiet repräsentativ, da viele von ihnen im direkten Einflussbereich von Brunnen liegen, zeigen aber, dass die entnahmebedingte Absenkung lokal durchaus einen deutlichen Anteil an der Gesamtveränderung ausmachen kann.

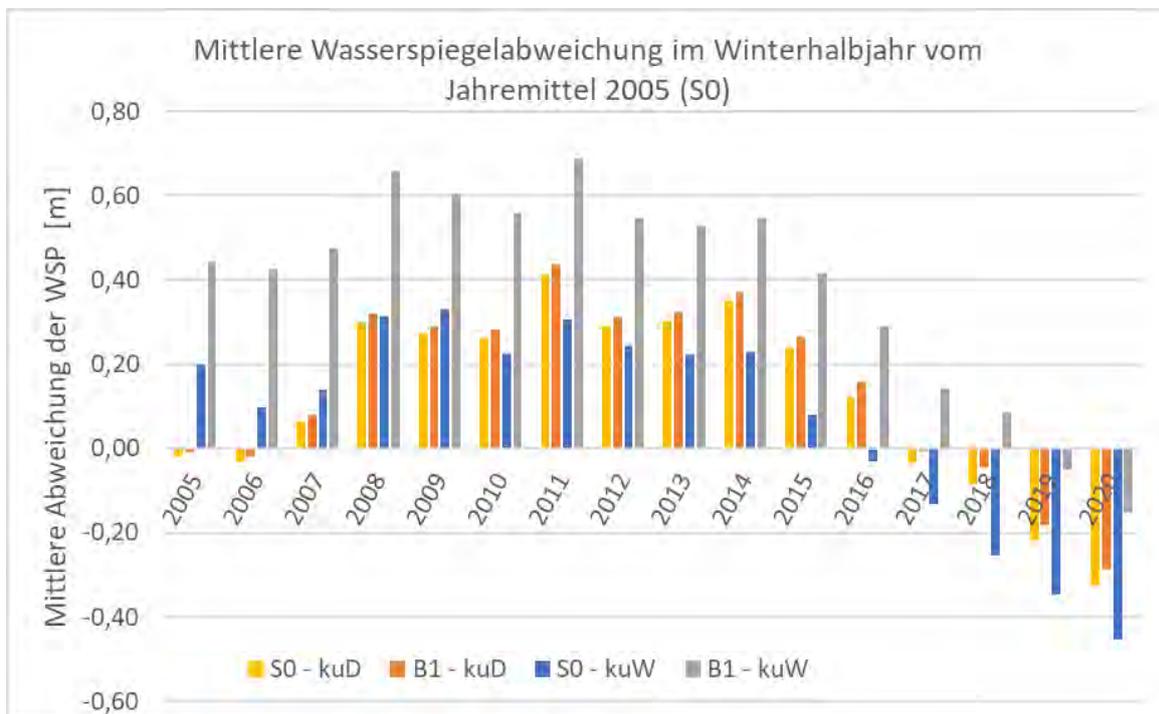


Abbildung 91: Vergleich der mittleren jährlichen Abweichung der Winterwasserspiegel von Ausgangsjahr 2005 für alle Doppel-GWM und Beobachtungspunkte

- **Wie unterscheiden sich die nicht bewässerten Äcker in der Bergtheimer Mulde von den bewässerten Feldern hinsichtlich Verdunstung und Versickerung?**

Durch die Bewässerung steigen sowohl Verdunstung als auch Sickerwasserbildung auf den bewässerten Flächen an. Die Größenordnung hängt von den lokalen Gegebenheiten (Boden, Fruchtfolge, Geländeneigung) und der Bewässerungsintensität ab. Wie in Kap.8.2.3 durch den Vergleich der Simulationsergebnisse für das Szenario B1 (keine Bewässerung) mit dem Ist-Zustand (S0) abgeleitet wurde, liegt die Zunahme der Verdunstung im Bereich von 5 – 80 mm/a (Mittel über alle bewässerten Flächen bei 6 mm/a). Bei optimaler Bewässerung sollte sich die Sickerwasserbildung kaum erhöhen, was jedoch sowohl in der Realität als auch bei der Simulation mit den verwendeten Bewirtschaftungsdaten nicht erreicht wird. Je nach Beregnungsintensität liegen die simulierten zusätzlichen Sickerwasserspenden zwischen 0 und 116 mm/a (Mittel über alle bewässerten Flächen bei 5 mm/a). Die unterschiedliche räumliche Verteilung ist in Abbildung 72 dargestellt.

- **Wie verändert sich der Landschaftswasserhaushalt, wenn vermehrt bewässerungsstarke Kulturen angebaut werden?**

Auch im intensiv ackerbaulich genutzten Gebiet der Bergtheimer Mulde werden derzeit nur ca. 8 % der Gesamtfläche für den Gemüseanbau genutzt. Berücksichtigt man auch Fruchtfolgen, die z.B. Kartoffeln als bewässerte Kulturen enthalten, so kommt man auf einen Flächenanteil von etwa 16 %, der potenziell bewässert wird. Bei Zugrundelegung der derzeit genehmigten GW-Entnahmemengen würde auch bei einer Zunahme dieser Flächen um 25 % der Einfluss des Klimawandels den Einfluss des Bewässerungslandbaus überprägen. Jedoch haben die Analysen gezeigt, dass es durch die verstärkten Grundwasserentnahmen lokal zu deutlich abgesenkten Grundwasserhöhen kommen würde.

- **Welche jährlichen Grundwasserentnahmemengen sind in der Modellregion mittelfristig nachhaltig nutzbar?**

Die nachhaltige Nutzung von Grundwasserressourcen wird im Allgemeinen definiert als eine Grundwasserentnahme, die durch Grundwasserneubildung wieder regeneriert wird.

Im Falle der Bergtheimer Mulde zeigen sich bereits unter natürlichen Bedingungen (keine Entnahmen wie in Szenario B1) sinkende Grundwasserstände. Zumindest in den letzten etwa 6 Jahren seit 2014 wären keine nachhaltigen Entnahmen realisierbar gewesen. Sollte sich der Trend wie in diesem Zeitraum begonnen weiter fortsetzen, bleibt die Grundwasserbilanz weiter negativ, bis sich ggf. ein neues Gleichgewicht einpendelt, wenn sich die klimatische Situation - auf einem neuen Niveau – stabilisiert. Das hieße, dass sich bei verringertem Input ins System auch der Output (z.B. der grundwasserbürtige Abfluss der Oberflächengewässer) verringert, weil z.B. bei sinkenden Grundwasserspiegeln einige Gewässer nicht mehr ans Grundwasser angebunden sind. Die realisierbaren nachhaltigen Entnahmen sind folglich stark abhängig vom klimatischen Input und auch vom Betrachtungszeitraum. Für den Simulationszeitraum ist die Grundwasserbilanz zwischen 2005 und 2013 überwiegend positiv (Basisszenario S0), hier wären auch die genehmigten Entnahmen (Szenario B2) realisierbar gewesen, ohne dass die Gesamtbilanz dieses Zeitraums ins Negative verschoben worden wäre. Deutlich zeigt sich dies in den entsprechenden Abbildungen zur

Entwicklung des Klimas und der jährlichen Grundwasserbilanz im Modellierungszeitraum (siehe Abb. 44, 64 und 65 und Abbildung 92).

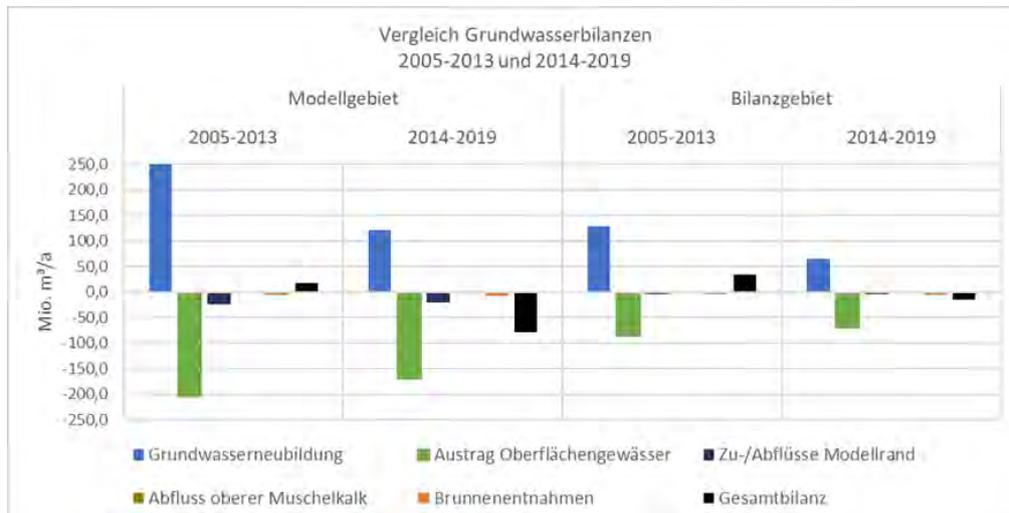


Abbildung 92: Vergleich Grundwasserbilanzen 2005-2013 und 2014-2019

Zusammenfassend stellt Tabelle 29 die Unterschiede der beiden Perioden dar.

Tabelle 29: Zusammenfassende Bewertung der Bilanzzeiträume 2005-2013 und 2014-2019

Zeitraum:	2005 - 2013	2014 - 2019
Klimasituation:	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlagsreichere Periode mit noch ausreichend Grundwasserneubildung - Kein signifikanter Temperaturanstieg - Immer wieder nassere Jahre z. B. 2007, 2010 - Positive klimatische Wasserbilanz 	<ul style="list-style-type: none"> - Niederschlagsärmere Periode mit gesunkener Grundwasserneubildung - Deutlicher Temperaturanstieg - Vermehrt Trockenjahre - Negative klimatische Wasserbilanz
Grundwasserbilanz:	Im Mittel über den Zeitraum positiv	Im Mittel über den Zeitraum negativ
Auswirkungen auf Grund- und Bodenwasserhaushalt:	<ul style="list-style-type: none"> - Ausgeglichene bis leicht steigende Grundwasserstände - Durch nassere Jahre Auffüllung des Boden- und Grundwasserspeichers - Risiko von Trockenstress geringer 	<ul style="list-style-type: none"> - Grundwasserzehrung - Sinkende Grundwasserstände - Höhere Grundwasserflurabstände - Häufigeres Trockenfallen von kleinen Oberflächengewässern - Verstärkter Trockenstress für (grundwasserabhängige) Ökosysteme
Fazit:	- Nachhaltige Grundwasserentnahme im Bilanzgebiet möglich	- Keine nachhaltige Grundwasserentnahme im Bilanzgebiet möglich

Unter der Annahme, dass sich künftig verstärkt trockene Verhältnisse einstellen, bzw. die Niederschläge ungünstig verteilt sind, sodass Oberflächenabflüsse zu- und Grundwasserneubildung abnehmen, muss davon ausgegangen werden, dass Grundwasserentnahmen grundsätzlich eine zusätzliche Belastung des Grundwasserhaushalts darstellen.

Die mit dem LWHM berechnete Klima- und Grundwasserneubildungsentwicklung deckt sich mit Modellierungsergebnissen des LfU für das Amtsgebiet des WWA Aschaffenburg, in welchen ebenfalls ein deutlicher Rückgang der Grundwasserneubildung sichtbar wird (siehe Abbildung 93).

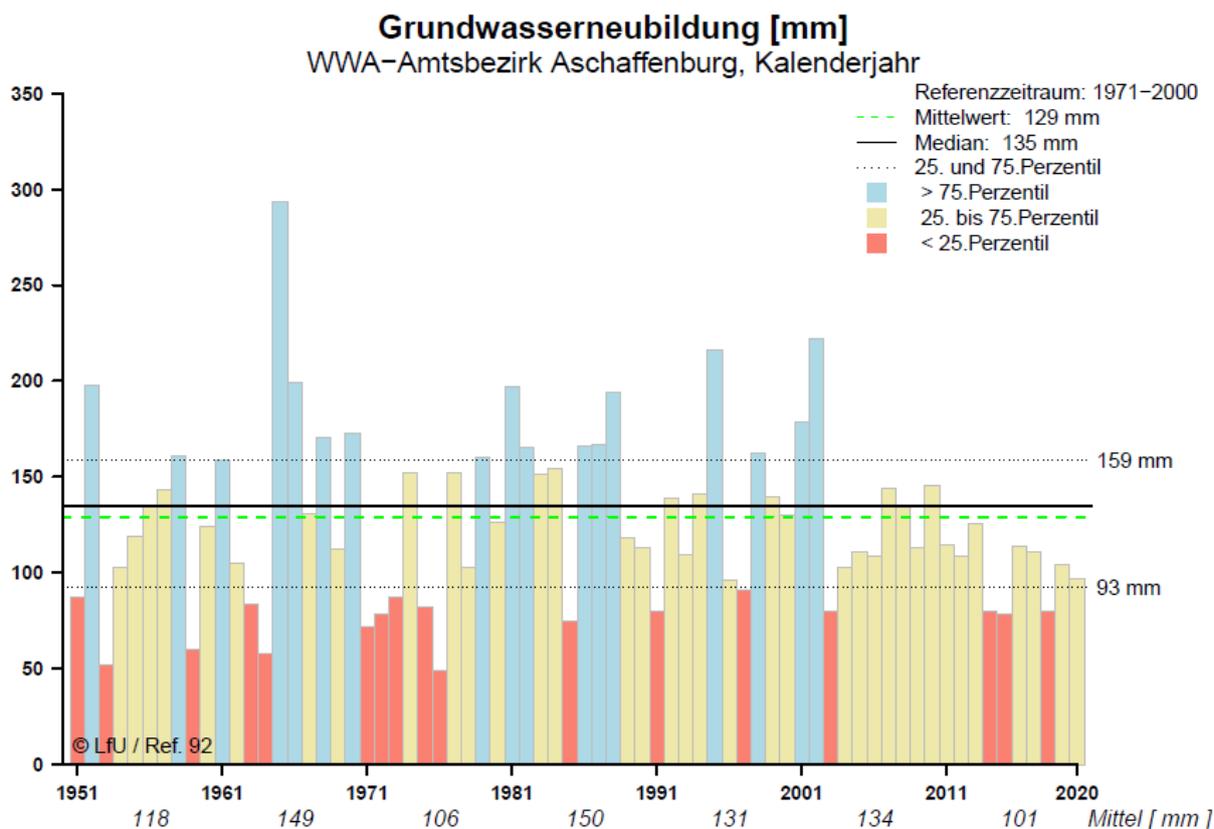


Abbildung 93: Entwicklung der Grundwasserneubildung für den WWA-Amtsbezirk Aschaffenburg (1950-2021)

Dieser 70-jährigen GWN-Zeitreihe zufolge sind die im Modellierungszeitraum 2005-2019 identifizierten nasseren Jahre 2007 und 2010 im Vergleich zu den vorangegangenen Dekaden zwar überdurchschnittlich, aber nicht besonders grundwasserneubildungsreich. Ebenso wird deutlich, dass der gewählte Modellierungszeitraum in der anhaltenden Trockenphase seit 2002 liegt. Aufgrund der vorhandenen Datenlage war eine Ausdehnung des Modellierungszeitraum weiter in die Vergangenheit nicht vorgesehen.

- **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.**

Das Trockenfallen der Gewässer im Modellgebiet kann aufgrund der unbekanntem Gewässergeometrien und Zusammenhänge zwischen Abfluss und Wasserspiegel in den Gewässern leider nicht abgebildet werden. Da der Unterschied zwischen Wasserführung im Gewässer und Trockenfallen bei den kleinen Gewässern im Untersuchungsgebiet nur wenige Dezimeter beträgt, ist eine Aussage mit den (nicht) verfügbaren Daten zu Gewässergeometrien nicht sinnvoll.

- 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).

Die Daten sind aus Tabelle 24 und Tabelle 20 zu entnehmen. Die Grundwasserneubildung ändert sich um weniger als 1 %, die grundwasserbürtigen Abflüsse in den Vorflutern reduzieren sich um etwa 2 % (Tabelle 24). Die Veränderung der Grundwasserspiegel macht sich vor allem nahe Brunnen bemerkbar, die ihre genehmigten Entnahmen derzeit nicht ausschöpfen. Im Zentimeter- bis Dezimeterbereich zeigen sich diese sommerlichen Absenktichter auch im oberflächennahen Grenzdolomit und in den Höhen des Grundwasserflurabstands (vgl. Abb. 73). Damit können die durch Brunnen verursachten Grundwasserabsenkungen negative Auswirkungen auf grundwasserabhängige Vegetationsbestände und Feuchtgebiete, Quellen und Gewässer haben. Vor allem im gespannten kuW erreichen die Absenktichter auch größere Reichweiten, die teils noch im Winter erkennbar sind (Abbildung 94).

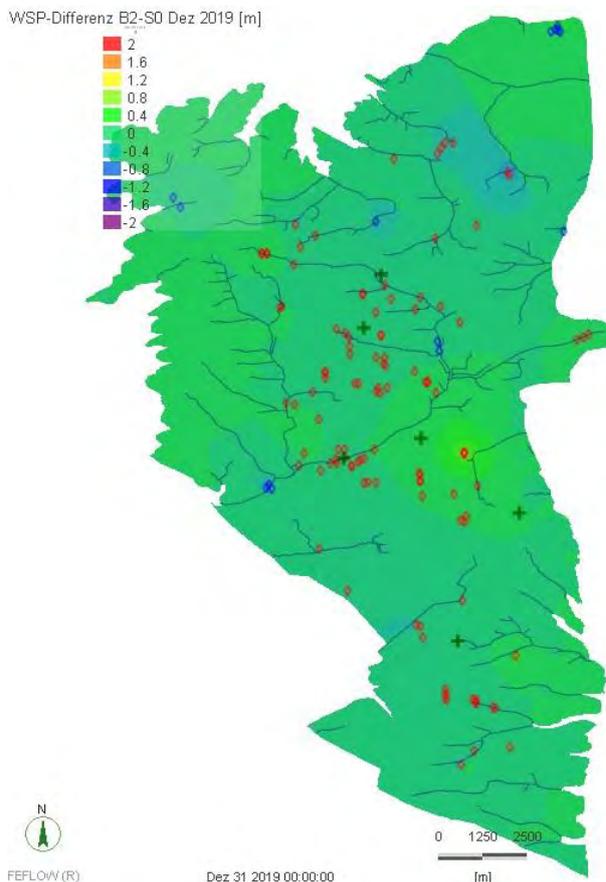


Abbildung 94: Wasserspiegelvergleich Szenario B2 und S0 im Winter 2019 (kuW)

9 Modellbewertung und Ausblick

Das komplexe System des Landschaftswasserhaushalts in der Bergtheimer Mulde wurde erfasst und im Rahmen der technischen Möglichkeiten und vorhandenen Datenbasis modelltechnisch umgesetzt. Eine Modellierung bildet immer eine vereinfachte Realität ab. Ziel der Modellkonzeption und Umsetzung muss es deshalb sein, bei der Abstraktion der Realität die Fragestellungen, welche mit dem Modell zu beantworten sind im Auge zu behalten – so einfach wie möglich, so komplex wie nötig.

Die korrekte Abbildung komplexer Geometrien, Geologie und Prozesse setzt immer eine entsprechend umfangreiche, repräsentativ verteilte Datengrundlage und ein umfangreiches Systemverständnis voraus. Die Abbildung des Landschaftswasserhaushalts 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 mehreren Grundwasserstockwerken, welche zu den Muldenrändern auslaufen und tektonischen Störungszonen lässt sich in ihrer Heterogenität kaum mit einem repräsentativen Netz an Messdaten abbilden. In der Modellierung muss der Fokus daher auf den wesentlichen Systemeigenschaften liegen.

Das gekoppelte Landschaftswasserhaushaltsmodell setzt den Fokus auf die regionale Wasserbilanz und die Veränderung von Wasserhaushaltsgrößen und Grundwasserspiegel in Teilgebieten. Lokale Aussagen sind vor allem durch die räumliche Auflösung der Input-Daten und die räumliche Auflösung der Modelleinheiten (Zellen) nur bedingt belastbar. Dies gilt insbesondere für die Randbereiche des Modellgebiets, die naturgemäß mit größeren Unsicherheiten behaftet sind, da sich nicht alle relevanten Einflussgrößen am Modellrand abgrenzen lässt, z.B. der Einzugsbereich randnaher Brunnen oder Gewässereinzugsgebiete, die über das Modellgebiet des Unteren Keuper hinausreichen.

Das Modell gibt einen guten Überblick über die Zusammenhänge zwischen klimatischen und anthropogenen Einflüssen auf den Wasserhaushalt im Modell- und Bilanzgebiet. Die absoluten Modellergebnisse im Hinblick auf Bilanzgrößen und Grundwasserstände sind anhand verfügbarer Zeitreihen zu den Beobachtungsgrößen Grundwasserspiegel und Gewässerabflüsse sowie durch Kenntnis von In- und Outputgrößen (Niederschlag, Temperatur, Grundwasserentnahmen etc.) plausibilisiert und kalibriert und liefern Aussagen auf der Quadratkilometer-Skala.

Auf der lokalen Skala, an einzelnen Bewirtschaftungseinheiten, einzelnen Brunnen und Messstellen sind die Aussagen nicht quantitativ zuverlässig. Hier lässt sich aber die große Stärke der (numerischen) Modellierung nutzen. Der Vergleich verschiedener Varianten und Was-wäre-wenn-Szenarien lässt die Auswirkungen von Einflussfaktoren und Maßnahmen qualitativ und semi-quantitativ hervortreten.

Das Modell ist in der Lage, die Einflüsse, auf die das System besonders sensitiv reagiert, hier nämlich die klimatischen Veränderungen, vor allem die Veränderungen des Niederschlags und die großen Grundwassernutzungen, vor allem die ganzjährigen Entnahmen der Trinkwasserversorger, qualitativ und quantitativ abzubilden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich folgende Möglichkeiten für eine künftige Optimierung des Modells zur Erweiterung der Erkenntnisse nennen:

Das Grundwassermodell ist, um die geschichteten Grundwasserleiter abzubilden, in mehrere numerische Modellschichten unterteilt. Es ergeben sich im Übergang zwischen Grundwasserleiter und Grundwasserstauer starke Durchlässigkeitskontraste und insbesondere im Umfeld von Entnahmebrunnen große hyd-

raulische Gradienten. Gleiches gilt entlang der Gewässer, wo ein Austausch zwischen Grund- und Oberflächengewässer stattfindet. Extreme hydraulische Gradienten begünstigen numerische Instabilitäten und lassen sich nur durch eine hohe räumliche Auflösung des numerischen Modellgitters adäquat abbilden. Bei dem vorliegenden instationären, regionalen Modell mit mehreren Grundwasserstockwerken ist die räumliche Auflösung des numerischen Modellgitters, also die Anzahl der Berechnungsknoten durch die erforderliche Rechenkapazität und -zeit begrenzt. Eine bessere vertikale Auflösung wäre wünschenswert, lässt sich aber unter den gegebenen Umständen nur in kleinen Teilbereichen umsetzen. Möglich wäre das für räumlich begrenzte Fragestellungen, zum Beispiel Betrachtungen im Zentralbereich der Mulde, wo eine Vielzahl an Grundwasserentnahmen und Einflüsse durch Oberflächengewässer aufeinandertreffen.

Für die verbesserte Abbildung der Verhältnisse im Grundwasser wäre eine höhere Auflösung der hydrogeologischen Input-Daten erforderlich. In einigen Bereichen, besonders entlang von Störungszonen, liegen wenige oder widersprüchliche Bohrprofile vor, was die Abbildung des Untergrundes erschwert. Auch wenn mehr qualitativ hochwertige und tiefreichende Bohrprofile oder Pumpversuche wünschenswert wären, ist der erforderliche Aufwand hoch und vermutlich nur im Kontext spezifischer Fragestellung lokal begrenzt sinnvoll.

Die Daten zu den Brunnen im Modell sind teilweise lückenhaft, sowohl was den Ausbau der Brunnen als auch die Entnahmen angeht. Im Modell mussten die Brunnen daher, teils basierend auf geschätzten Ausbautiefen, den Grundwasserleitern zugeordnet werden und die Entnahmen approximiert werden. Zu empfehlen wäre, das Verzeichnis der Grundwasserentnahmen sukzessive zu verbessern. Neben einer kontinuierlichen Aufzeichnung der Entnahmemengen sollten, sofern verfügbar, auch Daten zu den real erschlossenen Grundwasserleitern aufgenommen werden. Erfahrungsgemäß genügt dazu ein Ausbauplan mit Bohrprofil nicht immer, da viele Brunnen den Hauptanteil des Wassers aus eng begrenzten Bereichen der Filterstrecke fördern, nicht selten aus den obersten Metern, gelegentlich auch aus dem eigentlich abgesperrten Bereich oberhalb der Filterstrecke. Realistische Aussagen liefern daher nur geophysikalische Untersuchungen. Besonders interessant sind diese für die Trinkwasserbrunnen und die großen Brauchwasserentnahmen.

Die Erfassung der realen Bewirtschaftung der Landwirtschaftsflächen erwies sich als schwierig. Sowohl Fruchtfolgen als auch die Bewässerung der Flächen konnten nur stark vereinfacht abgebildet werden. Trotzdem erscheint die simulierte Größenordnung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sowohl zeitlich als auch räumlich durch die Modellierung erfasst worden zu sein. Eine weitere Verbesserung kann nur kleinskalig bei enger Zusammenarbeit mit den dortigen landwirtschaftlichen Betrieben erzielt werden.

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. Zwischenzeitlich sind weitere Abflussmesspegel errichtet worden. Mit der Hilfe dieser Daten lassen sich die Gewässerabflüsse besser kalibrieren und vor allem das zeitweise Trockenfallen von Gewässern abbilden. Dadurch ließe sich die Bilanzierung des Wasserhaushalts für das Gesamtgebiet weiter verbessern. Durch die Erhebung von Vermessungsdaten von Gewässern könnten die Gewässerhöhen präzise ins Modell eingearbeitet werden. Der wasserspiegelabhängige Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser würde dadurch vor allem auf der lokalen Skala wesentlich an Aussagekraft gewinnen. Unter Einbindung der Wasserspiegel-Abfluss-Beziehungen können die jahreszeitlichen Wasserspiegelschwankun-

gen 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, die Auswertung der Sensitivitäts- und Bewirtschaftungsszenarien trägt zu einem vertieften Systemverständnis bei.

Weitergehende Fragestellungen können damit gezielter angegangen werden.

Sind lokal belastbare Aussagen gewünscht, sind u.U. lokale Untersetzungen der räumlichen Diskretisierung des Landschaftswasserhaushaltsmodell und der Randbedingungen wie der Grundwasserentnahmeraten z.B. über Modelllupen erforderlich.

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

10 Literatur

- Ad-hoc-AG Bodenkunde, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, 438 S., Hannover. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 2008. Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok), ATKIS-Katalogwerke, ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM Version 6.0 Stand: 11.04.2008
- ATV-DVWK, 2002. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, Merkblatt ATV-DVWK-M 504
- Bauer Consult 2008. Umweltverträglichkeitsprüfung - Entnahme von Grundwasser aus sieben Brauchwasserbrunnen, Gemarkung Eßleben durch [REDACTED] und [REDACTED]. Haßfurt: Bauer Consult, 2008.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2018. Gewässerstrukturkartierung von Fließgewässern in Bayern - Erläuterung zur Erfassung und Bewertung. Augsburg LfU, Referat 63, 2018.
- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W., Pfützner, B. 2002. The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384. ISBN 1-887201-34.
- Freudenberger, W. 2003. Geologische Karte von Bayern 1:25.000 - Erläuterungen zum Blatt 6025 Werneck. Augsburg : s.n., 2003.
- Freudenberger, W, et al. 2003. Geologische Karte von Bayern 1 : 25.000 - Beiträge zum Blatt 6126 Dettelbach. München : Bayrisches Geologisches Landesamt, 2003.
- igi Niedermayer Institut. 1999. Neufestsetzung eines Trinkwasserschutzgebietes für den Brunnen 2 Versbach; Unterlagen zum wasserrechtlichen Verfahren [...] Dokumentierender Bericht mit Anlagen über die Abflussmessungen an der Pleichach am 22.10.1998 und 07.07.1999. Wetheim : Trinkwasserversorgung Würzburg GmbH, 1999.
- KLIWA, 2017. Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951 2015). KLIWA Berichte Heft 21; <http://www.kliwa.de/publikationen-hefte.htm>
- Klöcking, B. (Ed.) 2009. Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO, 53 S., [online verfügbar: <http://www.arcegmo.de/PSCN.pdf>].
- Klöcking, B., Wenske, D., Knab, G., Pfützner, B., Reinicke, F., Ihling, H., Rost, A., Haferkorn, U. 2018. ReArMo – Ein Modellverbund zur Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 39.18, 215-225
- Kopp, B., Baumeister, C. Gudera, T., Hergesell, M., Kampf, J., Morhard, A., Neumann, J. 2018. Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 62/2, 62-76.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool – Theoretical documentation Version 2005 (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>). USDA Agricultural Research

Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory in Temple, Texas, USA, Section 5 and 6, 275-324

- Pfützner, B. (Ed.) 2002. Modelldokumentation ArcEGMO. <http://www.arcegmo.de>, ISBN 3-00-011190-5.
- Pfützner, B., Klöcking, B., Schumann, A., Hesse, P. 2013. Klimafolgenstudie 2012 - Wasser: Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt, Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Heft 5 (Band 1), ISSN 0941-7281, 176 S.
- Richter, D., 1995. Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 194, 93 Seiten, Offenbach am Main 1995.
- Rosemann, H. J., Vedral, J. 1971. Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, H. 6, 1971
- UmweltAtlas. <https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/kartendienste/umweltatlas/index.htm>
- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J.R., Spanel, D.A. 1989. The EPIC crop growth model. Transactions of the ASAE 32, 497-511