

Leistungen zum hydro(geo)logischen Fachbeitrag im Rahmen des WLV-Projektes

“Entwicklung eines nachhaltigen und klimaangepassten Wassermanagements im Wassergewinnungsgebiet Borken – Im Trier“

Integrierte Wasserhaushaltsmodellierung

WLV-Westfälisch-Lippischer
Landwirtschaftsverband

Bericht

Dieser Bericht wurde im Rahmen des DHI Business-Management-Systems
(Bureau Veritas - zertifiziert nach ISO 9001, Qualitätsmanagement) erstellt.



Erstellt von

7/8/2025

X 

Signed by: Ferdinand Flechtner

Genehmigt von

08.07.2025

X 

Signed by: Katja Eulitz

Leistungen zum hydro(geo)logischen Fachbeitrag im Rahmen des WLV-Projektes

“Entwicklung eines nachhaltigen und klimaangepassten
Wassermanagements im Wassergewinnungsgebiet Borken – Im
Trier“

Integrierte Wasserhaushaltsmodellierung

Erstellt für Westfälisch-Lippischer
 Landwirtschaftsverband e.V.
Vertreten durch Carten Bohn, Dipl.-LÖK

Projektmanager	Ferdinand Flechtner
Projektbearbeitung	Maximilian Winderl, Philipp Huttner, Zoltan Trabak
Projektnummer	14807115
Revision	Final 1.0
Einstufung	Vertraulich

INHALT

Veranlassung und Zielsetzung	1
1.1 Bearbeitungskonzept	1
2 Datengrundlagen und Datenaufbereitung	2
2.1 Untersuchungsgebiet – Digitales Geländemodell	2
2.2 Klimatische Eingangsgrößen und Grundwasserneubildung	2
2.3 Flächennutzung	4
2.3.1 Drainierte Flächen nach mGROWA	6
2.4 Gewässernetz und -morphologie	7
2.4.1 Gewässerpegel	8
2.4.2 Gewässermorphologie und Gewässerausbau	10
2.5 Bodenparameter	11
2.6 Hydrogeologie	13
2.6.1 Geologische und hydrogeologische Kartenwerke	13
2.6.2 Geologische Aufschlüsse	14
2.6.3 Grundwassergleichenpläne	14
2.6.4 Grundwasserstandsdaten	16
2.6.5 Grundwasserentnahmen	17
2.6.6 Grundwasserneubildung	23
3 Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells	24
3.1 Modellierungssoftware	24
3.2 Modellaufbau	24
4 Aufbau des voll gekoppelten Grundwassermodells /	
Wasserhaushaltsmodell (MIKE SHE)	27
4.1 Modellierungssoftware	27
4.1.1 1D - Gewässermodell (MIKE Hydro River)	28
4.1.2 Kopplung von Gewässer und Wasserhaushaltsmodell	29
4.2 Untersuchungsgebiet und betrachteter Zeitraum	30
4.2.1 Klimatische Eingangsgrößen	31
4.3 Topografie	33
4.4 Flächennutzung und Vegetationsparameter	33
4.4.1 Flächenversiegelung	33
4.4.2 Vegetationsparameter	34
4.5 Grundwasserentnahmen	35
4.5.1 Trinkwasserversorgung	35
4.5.2 Gewerbe, Industrie und Sonstige	35
4.5.3 Landwirtschaftliche Bewässerung	35
4.6 Oberflächenabfluss	37
4.7 Gewässermodell	38
4.7.1 Gewässernetz	39
4.7.2 Gewässermorphologie	39
4.7.3 Bauwerke	40
4.7.4 Oberflächenwassereinleitungen	40
4.8 Ungesättigte vertikale 1-D Sickerwasserströmung in der oberen Bodenzone	43
4.8.1 Vertikale Diskretisierung der Modellschichten	43
4.8.2 Parametrisierung der Hauptbodenarten	44
4.9 Gesättigte 3-D Grundwasserströmung	44
4.9.1 Geologie	44
4.9.2 Randbedingungen	44

4.9.3	Drainierte Flächen	44
5	Kalibrierung	47
5.1	Stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells (MIKE SHE)	48
5.1.1	Ergebnis Modell Parametrisierung	49
5.1.2	Güte der stationären Kalibrierung	49
5.2	Instationäre Kalibrierung des Grundwassermodells (MIKE SHE)	50
5.2.1	Ergebnis Modell Parametrisierung	51
5.2.2	Kalibrierte Grundwasserganglinien	53
5.2.3	Kalibrierte Gewässerpegel	57
6	Ergebnisse IST-Zustand	59
6.1	Grundwasser	59
6.2	Wasserbilanz	64
7	Szenarien – Maßnahmen zum Wasserrückhalt	68
7.1	Referenzszenario Trocken	70
7.2	Referenzszenario Nass	71
7.3	Szenario - Statische Wehrbauwerke	73
7.3.1	Vergleich Referenzlauf 2011-2022	74
7.3.2	Trockenjahr Simulation	78
7.3.3	Nassjahr Simulation	82
7.4	Szenario – Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke - Sommer 40cm	85
7.4.1	Vergleich Referenzlauf 2011-2022	85
7.4.2	Trockenjahr Simulation	88
7.4.3	Nassjahr Simulation	92
7.5	Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke - Sommer offen	96
7.5.1	Vergleich Referenzlauf 2011-2022	96
7.5.2	Trockenjahr Simulation	100
7.5.3	Nassjahr Simulation	104
7.6	Vergleich Wehrsteuerungsszenarien	107
7.7	Szenario – Grabenaufschüttung und Drainageverschluss	110
7.7.1	Vergleich Referenzlauf 2011-2022	110
7.7.2	Trockenjahr Simulation	111
7.7.3	Nassjahr Simulation	113
7.8	Szenario - Lokale Maßnahmen im Fellerhofgraben	115
7.8.1	Vergleich Referenzlauf 2011-2022	115
7.8.2	Nassszenario Simulation	118
7.9	Szenario - Lokalen Maßnahmen im Hungerbach	119
8	Zusammenfassung und Ausblick	121
9	Literaturverzeichnis	123

ABBILDUNGEN

Abbildung 2-1:	Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes im Bereich des Untersuchungsgebiets.	3
Abbildung 2-2:	Landnutzungskarte basierend auf dem ALKIS digitalen Basis-Landschaftsmodell.	5
Abbildung 2-3:	Mittlerer jährlicher Drainageabfluss (1981-2010) mm/a vom mGROWA 2019.	6
Abbildung 2-4:	Gewässernetz mit Grabenstrukturen im Modellgebiet.	8
Abbildung 2-5:	Pegel an den Fließgewässern innerhalb des Modellgebiets.	9
Abbildung 2-6:	Bodenübersichtskarte BK 1:50.000 (Quelle: Geologischer Dienst NRW). ...	12
Abbildung 2-7:	Bodenarten innerhalb des Modellgebiets Borken im Trier.	13
Abbildung 2-8:	Modellgebiet mit dem Grundwassergleichenplan und dem Grundwasserkörper [LANUV].	15
Abbildung 2-9:	Übersichtskarte der Grundwassermessstellen (NRW und Aquanta) im Modellgebiet.	17
Abbildung 2-10:	Grundwasserentnahmen aus dem Modellgebiet.	19
Abbildung 2-11:	Grundwasserentnahmen aus dem Modellgebiet nach Nutzungsart – exkludiert Trinkwasserversorger [Landkreis Borken].	20
Abbildung 2-12:	Lage der Wasserwerke und entsprechenden Wasserschutzgebiete im Modellgebiet.	23
Abbildung 3-1:	Verwendete Bohrungen für die hydrogeologische Strukturmodellierung.	24
Abbildung 3-2:	Darstellung der geologischen Profilschnitte im dreidimensionalen Raum zusammen mit den Bohrprofilen. (20-fach überhöht, Blick nach Nordosten)	25
Abbildung 3-3:	Geologische Karte.	25
Abbildung 3-4:	Dreidimensionale Darstellung des geologischen Strukturmodells. NW-SE Schnitt. Ocker – Deckschicht. Gelb – Halterner Sande. Grün – Stauer.	26
Abbildung 4-1:	Modellsystem MIKE SHE mit Beschreibung der berechenbaren Wasserhaushaltskomponenten.	27
Abbildung 4-2:	Schematische Kopplung von Gewässer und Wasserhaushaltsmodell.	29
Abbildung 4-3:	Vereinfachte Darstellung der MIKE SHE – MIKE Hydro River (neue Version von MIKE 11) Kopplung im Querschnitt.	29
Abbildung 4-4:	Abgrenzung des Modellgebiets.	31
Abbildung 4-5:	Beispielhafter Ausschnitt der Zeitreihe des interpolierten Niederschlagsraster.	32
Abbildung 4-6:	Gesamte Zeitreihe der Referenz-Evapotranspiration nach FAO-56 der vorhandenen Klimastation (Stationsnummer 617).	33
Abbildung 4-7:	Beispielhafte vegetationsspezifische Zeitreihen für die Landnutzungstypen Wiese (oben), Landwirtschaft (Mitte) und Nadelwald (unten).	34
Abbildung 4-8:	Manuelle Zuordnung der Bewässerungsbrunnen auf die angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen.	37
Abbildung 4-9:	Räumliche Verteilung der Manning-Strickler Rauigkeiten.	38
Abbildung 4-10:	Exemplarisches Querprofil, welches in das Modell integriert wurde.	39
Abbildung 4-11:	Exemplarisches Längsprofil, als Resultat aus der Integration der Querprofile.	39
Abbildung 4-12:	Einleitungen von kommunalen Kläranlagen und industriellen Direkt einleitenden Betrieben.	41
Abbildung 4-13:	Abwassereinleitungen der kommunalen Kläranlagen Landkreis Borken – Mess-, Mittelwerte und Abwasserbescheide von 2018 bis 2023.	42
Abbildung 4-14:	Drainierte Flächen des MIKE SHE Modells mit Vergleich der potenziell dränierten Flächen des mGrowa Modells.	46
Abbildung 5-1:	Darstellung der für die Kalibrierung verwendeten Grundwassermessstellen.	48
Abbildung 5-2:	Standorte der Grundwassermessstellen für die Auswertung der instationären Kalibrierung.	53
Abbildung 5-3:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 76.	54
Abbildung 5-4:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle LA 15.	54

Abbildung 5-5:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle LA 05.	55
Abbildung 5-6:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 66.	55
Abbildung 5-7:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 67.	56
Abbildung 5-8:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 33E.	56
Abbildung 5-9:	Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 47.	57
Abbildung 5-10:	Kalibrierungsergebnis des Gewässerabflusspegels Borken-Stadt.	58
Abbildung 6-1:	Grundwassergleichenplan gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum. 60	
Abbildung 6-2:	Flurabstandskarte gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum.	61
Abbildung 6-3:	Grundwasserneubildung gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum. 251 mm/a. Abzüglich des Gewässeraustausches und der Drainageabflusses beträgt die Neubildung 93 mm/a.	63
Abbildung 6-4:	Klimabilanzsummen der Wasserwirtschaftsjahre 2012 bis 2022.	64
Abbildung 6-5:	Wasserbilanzsummen der Wasserwirtschaftsjahre 2012 bis 2022.	65
Abbildung 6-6:	Grundwasserbilanz der Wasserwirtschaftsjahre 2012 bis 2022.	66
Abbildung 6-7:	Resultierende Wasserbilanz auf durchschnittliche Jahressummen umgerechnet.	67
Abbildung 7-1:	Wasserbilanz Referenzszenario Trocken - 3-jährige Trockenperiode in Folge. Oben: Jährlich gemittelte Bilanz. Unten: Monatlich gemittelte Bilanz.	71
Abbildung 7-2:	Wasserbilanz Referenzszenario 3-jährige Nassperiode in Folge. Oben: Jährlich gemittelte Bilanz. Unten: Monatlich gemittelte Bilanz.	72
Abbildung 7-3:	Beispielhaftes Längsprofil eines Grabenabschnittes mit modellierten Wehrbauwerken. Die oberhalb verlaufenden Linien entsprechen den Grabenschultern (gestrichelt – links, durchgezogen rechts Richtung stromabwärts). 73	
Abbildung 7-4:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke - Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.	75
Abbildung 7-5:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.	77
Abbildung 7-6:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand in den Wasserwirtschaftsjahren 2018 und 2019.	78
Abbildung 7-7:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Grundwasserdifferenzen der 3- jährigen Trockenperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflusssdifferenzen im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.	79
Abbildung 7-8:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.	80
Abbildung 7-9:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre. Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Trocken“.	81
Abbildung 7-10:	Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.	83
Abbildung 7-11:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.	84
Abbildung 7-12:	Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“.	85

Abbildung 7-13: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	86
Abbildung 7-14: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.....	87
Abbildung 7-15: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.....	88
Abbildung 7-16: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflusssdifferenzen im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	89
Abbildung 7-17: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.....	90
Abbildung 7-18: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre. Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Trocken“.....	91
Abbildung 7-19: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	93
Abbildung 7-20: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.....	94
Abbildung 7-21: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“.....	95
Abbildung 7-22: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der saisonal gesteuerten Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	97
Abbildung 7-23: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.....	98
Abbildung 7-24: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.....	99
Abbildung 7-25: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	101
Abbildung 7-26: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.....	102
Abbildung 7-27: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre. Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Trocken“.....	103

Abbildung 7-28: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.....	105
Abbildung 7-29: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter	106
Abbildung 7-30: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Oben: Jahresgang der Wasserbilanz des ersten Jahres (Klimajahr 2023) der 3-jährigen Nassjahrsimulation. Unten: Differenz der Monatssummen mit Maßnahme im Vergleich zum Referenz ohne Maßnahmen in Kubikmetern.	107
Abbildung 7-31: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.	111
Abbildung 7-32: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode durch Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr.	112
Abbildung 7-33: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre.	114
Abbildung 7-34: Wasserstand vor Wehr (Maßnahmenszenario) und Abflussvergleich der lokalen Maßnahme Fellerhofgraben mit Referenzzustand. Wehroberkante und Unterkante sind in Rot dargestellt.	116
Abbildung 7-35: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme eines einzelnen Stauwehrs am Fellerhofgraben mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.	117
Abbildung 7-36: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der saisonal-gesteuerten Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre.	118
Abbildung 7-37: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der Stauwehre am Hungerbachs mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.	120

TABELLEN

Tabelle 2-1: Verwendete digitale Grunddaten.	2
Tabelle 2-2: Datenerfassungstabelle Klimatische Eingangsgrößen.	2
Tabelle 2-3: Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes.....	3
Tabelle 2-4: Recherchierte Landnutzungsdaten.	4
Tabelle 2-5: Datenbestand Gewässerpegel und Ableitungen	7
Tabelle 2-6: Stammdaten des Stadt-Borken Pegels [vom LANUV am 29.06.2023 zur Verfügung gestellt]	9
Tabelle 2-7: Statistische Auswertung der hydrologischen Parameter für den LANUV Pegel Stadt-Borken.	10
Tabelle 2-8: Verfügbare Pegeldaten des Auftraggebers, Messkampagne. [Quelle: vom WLV zur Verfügung gestellt]	10
Tabelle 2-9: Vorhandene Gewässermorphologie.	11
Tabelle 2-10: Datenbestand der Bodenkartenwerke.....	11
Tabelle 2-11: Datenbestand geologische und hydrogeologische Kartenwerke.	13
Tabelle 2-12: Datenübersicht Grundwassergleichenpläne, Flurabstandskarten und Grundwasserkörper.	14
Tabelle 2-13: Datenstand Grundwassermessstellen.....	16
Tabelle 2-14: Datenbestand Grundwasserentnahmen	17

Tabelle 2-15: Grundwasserentnahme Erlaubnisse und Bewilligungen nach Nutzungsart.	18
Tabelle 2-16: Entnahmebrunnen mit fehlerhaften Angaben	21
Tabelle 2-17: Datenerfassung Grundwasserneubildung mGROWA.....	23
Tabelle 3-1: Modellierte geologische Schichten und Schichtpakete	26
Tabelle 4-1: Berechnungsansätze in MIKE SHE	28
Tabelle 4-2: Verwendete Parameter für die Verdunstungsberechnung nach Kristensen & Jensen.....	35
Tabelle 4-3: Einleitende Kläranlagen	42
Tabelle 4-4: Direkteinleitung industrielle Betriebe.	43
Tabelle 4-5: Vertikale Modelldiskretisierung der ungesättigten Zone.	43
Tabelle 4-6: Exemplarische Parametrisierung des weitverbreiteten schwach lehmigen Sand. .	44
Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der K_f -Werte (Initiale Werte und finale Werte).....	49
Tabelle 5-2: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Grundwasserstände mit statistischer Auswertung für die stationäre Kalibrierung.....	49
Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der K_f -Werte (Initiale Werte und finale Werte).....	51
Tabelle 5-4: Statistische Auswertung der instationären Kalibrierung.	52
Tabelle 7-1: Überblick der Szenarien.....	68
Tabelle 7-2: Vergleich der Wehrsteuerungsszenarien: Differenzen der Wasserhaushaltskomponenten zum Referenzlauf in Kubikmeter. Dargestellt sind die Differenzen im Vergleich für das jeweilige Szenario von 2011-2022, das Trockenszenario (TS), und das Nassszenario (NS)	109

Veranlassung und Zielsetzung

Als Fortführung des von der Stiftung Westfälische Landschaft geförderten Projektes „Wassermanagement und Bewässerung in Westfalen-Lippe“ soll für das Einzugsgebiet des Wasserschutzgebietes „Borken - Im Trier“ als Projektgebiet im Rahmen eines vom Land NRW geförderten Projektes kooperativ unter Einbindung der wasserwirtschaftlich relevanten Akteure ein Wassermanagementkonzept entwickelt werden, das die Grundlage für eine nachhaltige, klimaangepasste und zielgerichtete Nutzung und Bewirtschaftung der Ressource Grundwasser im Projektgebiet bilden soll. Hierbei soll insb. ein Fokus auf Strategien und Maßnahmen gelegt werden, die unter Berücksichtigung der durch den Klimawandel prognostizierten klimatischen Veränderungen eine Vorsorge gegen / Anpassungen an Dürren in Trockenzeiten ermöglichen, um auch bei zunehmenden Entnahmen und möglicher rückläufiger Grundwasserneubildung den vielfältigen Nutzungsansprüchen an das Grundwasser im Projektgebiet gerecht werden zu können.

Die Verwendung von Modellen für das Wassermanagement wird in der Forderung des DVGW (DVGW Wasser-Impuls: Zukunftsbilder 2030 bis 2100) betont. Dort wird u.a. beschrieben, dass bei der Entwicklung und Umsetzung langfristiger Zukunftskonzepte digitale Lösungen eine erhebliche Unterstützung sein werden. Dabei werden auch Prognose- und Managementmodelle für ganze Einzugsgebiete vorgeschlagen.

Für die hier vorliegende Zielsetzung wurde demnach ein numerisches, voll gekoppeltes Grundwassermodell bzw. Wasserhaushaltsmodell in dem Softwarepaket MIKE SHE aufgebaut. Mit dem Modell können u.a. geplante Maßnahmen, wie Sohlanhebungen oder künstliche Grundwasseranreicherungen, quantifiziert werden und dadurch der Kosten-Nutzen-Faktor eingeschätzt werden.

Anhand von modellierten Prognoseszenarien soll die Wirkung konkreter Maßnahmen auf den Wasserhaushalt und damit auf den Grundwasserspiegel untersucht werden. Diese Änderung des Grundwasserspiegels hat direkten Einfluss auf die Grundwasserneubildungsprozesse, sowie die Wasserstände und Abflussverhältnisse der Fließgewässer.

1.1 Bearbeitungskonzept

Der Aufbau des voll gekoppelten Grundwassermodells erfolgte in Projektphasen, die folgend aufgelistet sind und in den weiteren Kapiteln näher erläutert werden.

- Kapitel 2: Datengrundlagen und Datenaufbereitung. In dieser Projektphase werden alle Daten gesammelt und ausgewertet, die für den Aufbau des Modells nötig sind.
- Kapitel 3: Hydrogeologisches Strukturmodell. Grundlage für das voll gekoppelte Grundwassermodell ist der hydrogeologische Aufbau des Untergrunds. Hierfür wurde separat ein 3D-geologisches Strukturmodell erstellt, welches in diesem Kapitel beschrieben wird.
- Kapitel 4: Voll gekoppeltes Grundwassermodell / Wasserhaushaltsmodell (MIKE SHE). In dieser Projektphase wurde aus den Grundlagendaten das Modell erstellt.
- Kapitel 5: Kalibrierung. Diese Projektphase beinhaltet die Kalibrierung des Modells.
- Kapitel 6: Modellanwendung. In diese Projektphase wird das kalibrierte Modell verwendet, um Szenarien zu rechnen und auszuwerten.
- Kapitel 7: Zusammenfassung.

2 Datengrundlagen und Datenaufbereitung

Für den Modellaufbau wurden die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Datensätze und Unterlagen hinzugezogen und für die Verwendung aufbereitet. Das Modell und die zugehörigen Daten wurden im Koordinatensystem ETRS89 / UTM Zone 32N (EPSG 25832) aufgebaut bzw. bearbeitet.

2.1 Untersuchungsgebiet – Digitales Geländemodell

Digitale Grunddaten wurden mehrheitlich vom Nordrhein-Westfälischen Internet-Dienst-Portal „OpenGeoData“ [<https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/>] heruntergeladen. Eine Auflistung dieser folgt hier und in den einzelnen Kapiteln.

Tabelle 2-1: Verwendete digitale Grunddaten.

Bezeichnung	Datum, Geber/Quelle
1 m Digitales Geländemodell – Stand Februar 2023	16.02.2023, Land Nordrhein-Westfalen, Bezirksregierung Koeln, Geobasis NRW, Version 3.1 [Digitales Geländemodell - Gitterweite 1 m - Paketierung: Einzelkacheln (nrw.de)]
Digitale Flurkarte und Gemarken – Stand Januar 2023	16.02.2023, Land Nordrhein-Westfalen, Bezirksregierung Koeln, Geobasis NRW, Version 3.1 [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lk/akt/gmk_flur_shp/]

2.2 Klimatische Eingangsgrößen und Grundwasserneubildung

Die treibenden Größen des Wasserhaushaltsmodells sind die Eingangsgrößen Niederschlag und Verdunstung. Tabelle 2-2 zeigt, welche Klimadaten recherchiert und verwendet wurden. Die nächstgelegene Niederschlags- und Klimastationen im Umland des Modellgebiets sind in Tabelle 2-3 aufgelistet und räumlich in Abbildung 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-2: Datenerfassungstabelle Klimatische Eingangsgrößen.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Niederschlagsdaten des LANUVs für das Modellgebiet – Stand März 2021, bzw. Februar 2023	27.02.2023, Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) [http://luadb.lids.nrw.de/LUA/hygon/pegel.php?art=nieder&einzugsgebiet=ljssel]
DWD Niederschlagsdaten	09. Juni 2023, Deutscher Wetter Dienst Open Data
Referenz-Evapotranspirationsdaten	09. Juni 2023, Deutscher Wetterdienst Open Data

Tabelle 2-3: Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes.

Station ID	Station Name	Breitengrad	Längengrad	Station Höhe (m)
554	Bocholt-Liedern (Wasserwerk)	51.8293	6.5365	23
617	Borken in Westfalen	51.873	6.8863	47
871	Coesfeld	51.9618	7.1585	87
4150	Reken	51.8118	7.0907	59

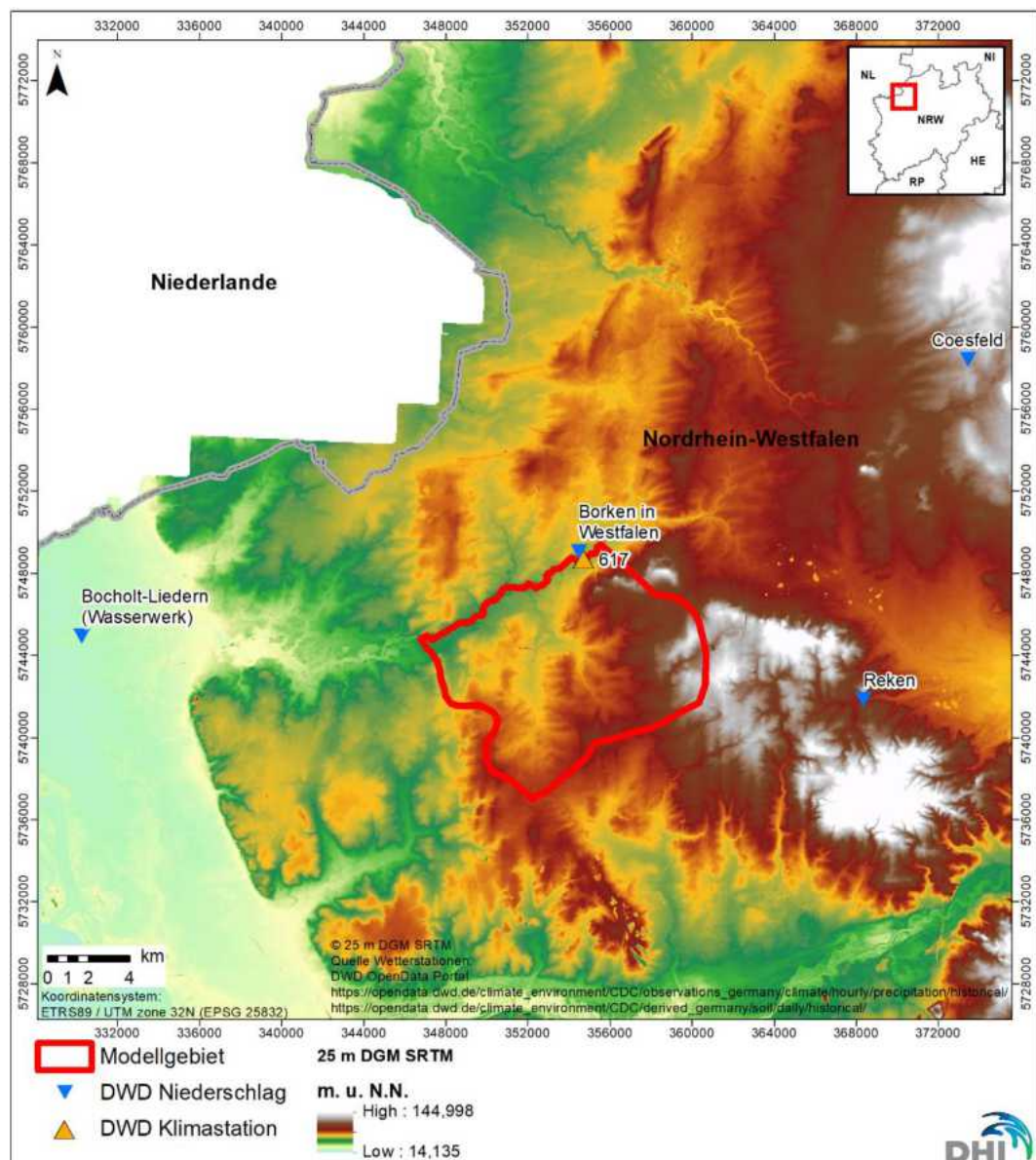


Abbildung 2-1: Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes im Bereich des Untersuchungsgebiets.

2.3 Flächennutzung

Die Landnutzung basiert auf dem digitalen Basis-Landschaftsmodell ALKIS, welches vom Land Nordrhein-Westfalen Online zur Verfügung gestellt wird. Diese wurde mit weiteren räumlichen Daten verglichen (Tabelle 2-4) und für das Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE aufbereitet.

Tabelle 2-4: Recherchierte Landnutzungsdaten.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Digitales Basis-Landschaftsmodell ALKIS (Landnutzungskarten Nordrhein-Westfalen) – Stand März 2023	20.03.2023, Geobasis NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/]
Umweltsensibles Dauergrünland in Nordrhein-Westfalen [Dauergrünland in Flora-Fauna-Habitat-Gebieten (FFH-Gebieten)] – Stand Januar 2021	16.02.2023, Landwirtschaftskammer NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/bodennutzung/landwirtschaft/]
Forstamtsgrenzen Nordrhein-Westfalen – Stand Oktober 2011	16.02.2023, Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wald_forst/wald/forstamtsgrenzen_EPSG25832_Shape.zip]
Dauergrünland Nordrhein-Westfalen – Stand Februar 2019	16.02.2023, Landwirtschaftskammer NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/bodennutzung/landwirtschaft/DGL_EPSG25832_Shape.zip]
Eutrophierte Gebiete 2022 – Stand Dezember 2022	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/duv/EutrophierteGebiete-2022-12_EPSG25832_Shape.zip]
National-scale crop type maps for Germany 2017, 2018, 2019 und 2020 [10m Auflösung] – Stand August 2021	15.03.2023, Blickensdörfer, Lukas, Schwieder, Marcel, Pflugmacher, Dirk, Nendel, Claas, Erasmi, Stefan, & Hostert, Patrick. (2021). National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data (2017, 2018 and 2019) [Data sets 2017, 2018, 2019]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.5153047
Feldblöcke in NRW als Shape	Landwirtschaftskammer NRW [05.01.2024] https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/bodennutzung/landwirtschaft/
Beantragte und als förderfähig festgestellte Teilschläge in NRW als Shape	2023, Landwirtschaftskammer NRW [05.01.2024] https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/bodennutzung/landwirtschaft/
Hist. beantragte und als förderfähig festgestellte Teilschläge in NRW als Shape	2016-2022, Landwirtschaftskammer NRW [05.01.2024]

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
	https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/bodennutzung/landwirtschaft/

Die Landnutzung im Modellgebiet ist überwiegend agrarwirtschaftlich geprägt (siehe Abbildung 2-2), vor allem im südlichen Teil des Modellgebiets. Im Norden, nördlich der B67, und im Osten, östlichen von Heiden, befinden sich untergeordnet Nadelwälder. Diese und die Mischbebauung in und um Borken und Heiden stellen jeweils die nächsthäufigste Landnutzungsform nach der Landwirtschaft dar.

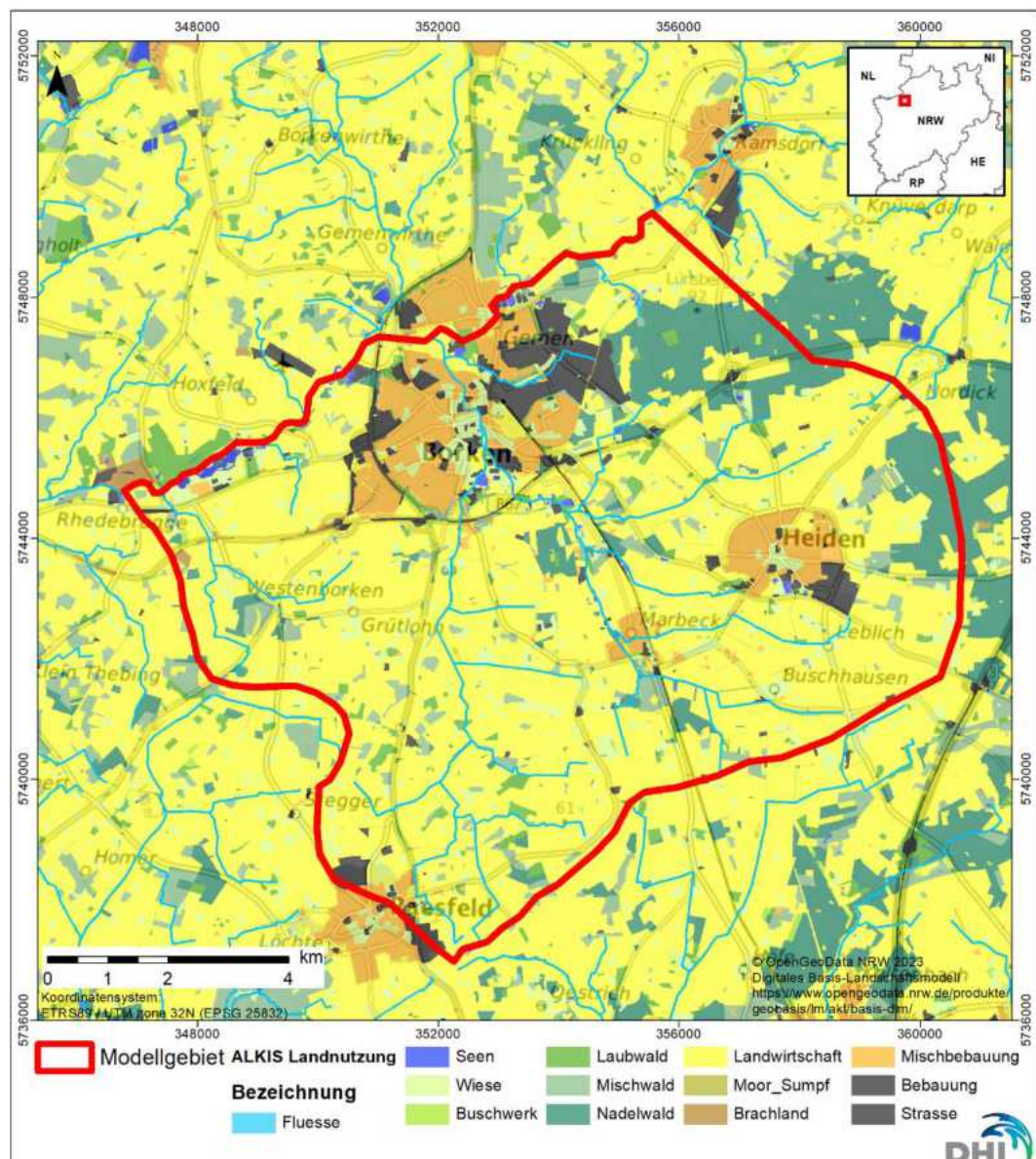


Abbildung 2-2: Landnutzungskarte basierend auf dem ALKIS digitalen Basis-Landschaftsmodell.

2.3.1 Drainierte Flächen nach mGROWA

Angaben über die Ausbreitung der drainierten Flächen und den langjährigen Mittelwert des Drainageabfluss (1981 – 2010) in Millimeter pro Jahr wurden aus dem mGROWA Modell (2019) entnommen (Abbildung 2-3). Laut dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (2021) wird die Abflussmenge der drainierten Flächen maßgeblich anhand der Tiefenlage der Dränagen im Verhältnis zu der in der Bodenkarte 1:50.000 publizierten Höhe des Grundwasser- / Stauwasserhorizonts definiert.

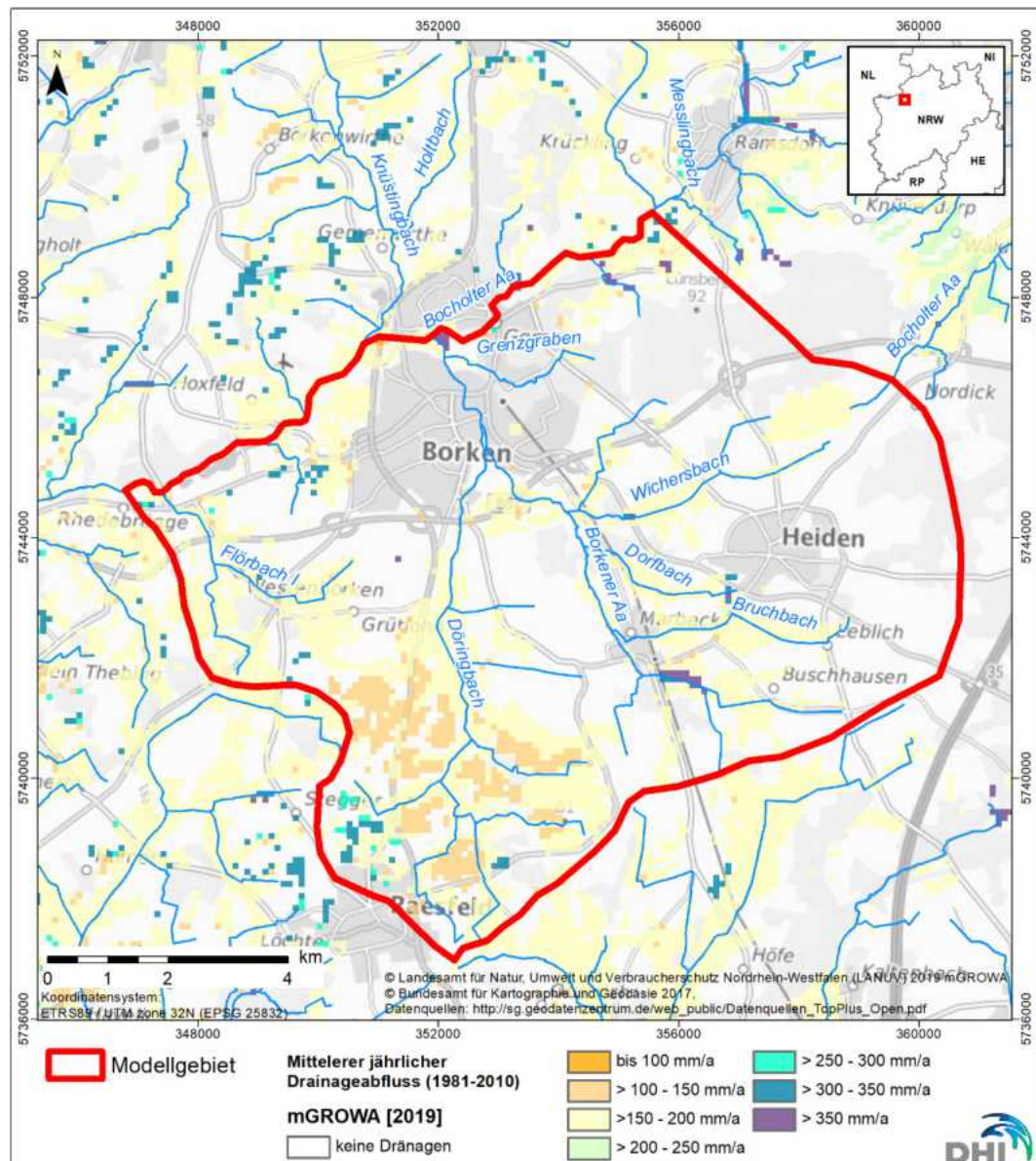


Abbildung 2-3: Mittlerer jährlicher Drainageabfluss (1981-2010) mm/a vom mGROWA 2019.

Die Entwässerung konzentriert sich primär in den östlichen (zwischen Wichersbach und dem Oberlauf des Borkener Aas), südlichen (Oberlauf des Döringbachs) und westlichen Gebieten.

2.4 Gewässernetz und -morphologie

Zu den Oberflächengewässern wurden die folgenden Daten zu den Pegeln und Ableitungen sowie zu Gewässerverläufen und -profilen recherchiert (Tabelle 2-5).

Das für die Modellierung verwendete Gewässernetz ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-5: Datenbestand Gewässerpegel und Ableitungen

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Oberflächengewässer Einzugsgebiet Karte Nordrhein- Westfalen – Stand September 2021	10.09.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/ogwk3d/]
Hydrologische Pegel, Stammdaten ausgewählter Gewässerpegel, Stand: Oktober 2021	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/hygon/]
Fließgewässertypen Nordrhein- Westfalen und LAWA – Stand Dezember 2021	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/fg-typen/]
Überschwemmungsgebiete Nordrhein-Westfalen – Stand August 2016	16.02.2023, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/hochwasser/uesg/]
Gewässerkataster Landkreis Borken [Gräbennetz & Verrohrung]	2017 [Landkreis Borken]
Sonstige Verbandsgewässer Landkreis Borken	Sept. 2023 [OpenData Landkreis Borken; sonstige Verbandsgewässer OpenDataPortal (kreis-borken.de)]
Sonstige Fließgewässer der Gewässerstationierungskarte GSK3E [Gräben als Teil des Fließgewässernetz]	30.11.2019, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/gsk3e/]

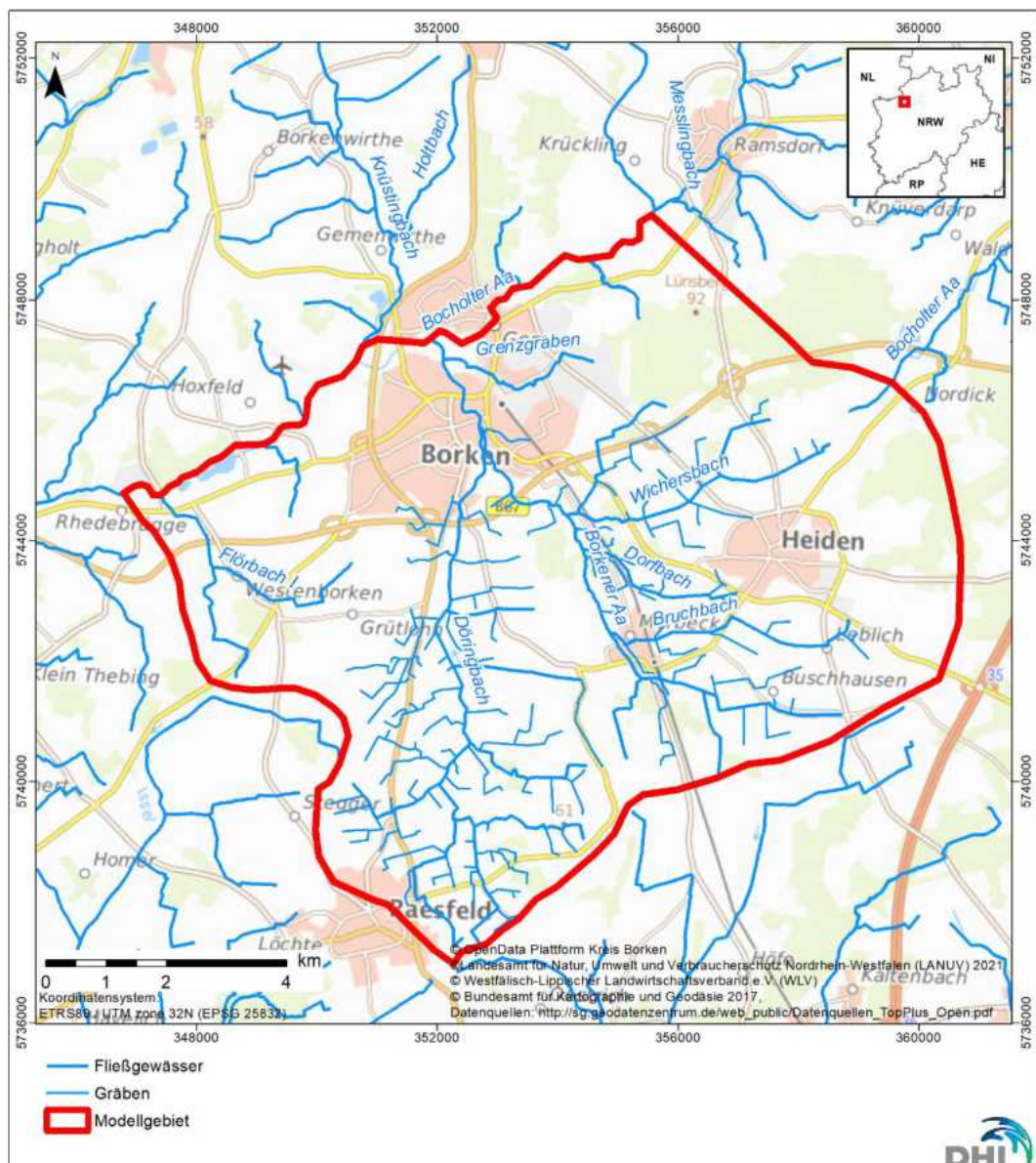


Abbildung 2-4: Gewässernetz mit Grabenstrukturen im Modellgebiet.

2.4.1 Gewässerpegel

Es stehen zwei Datenquellen über Gewässerstand und Gewässerabfluss zur Verfügung:

1. Von dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)
2. Von dem Auftraggeber (Westfälischer Landwirtschaftsverband – WLV)

Abbildung 2-5 zeigt die Positionierung der Gewässerpegel innerhalb des Modellgebiets.

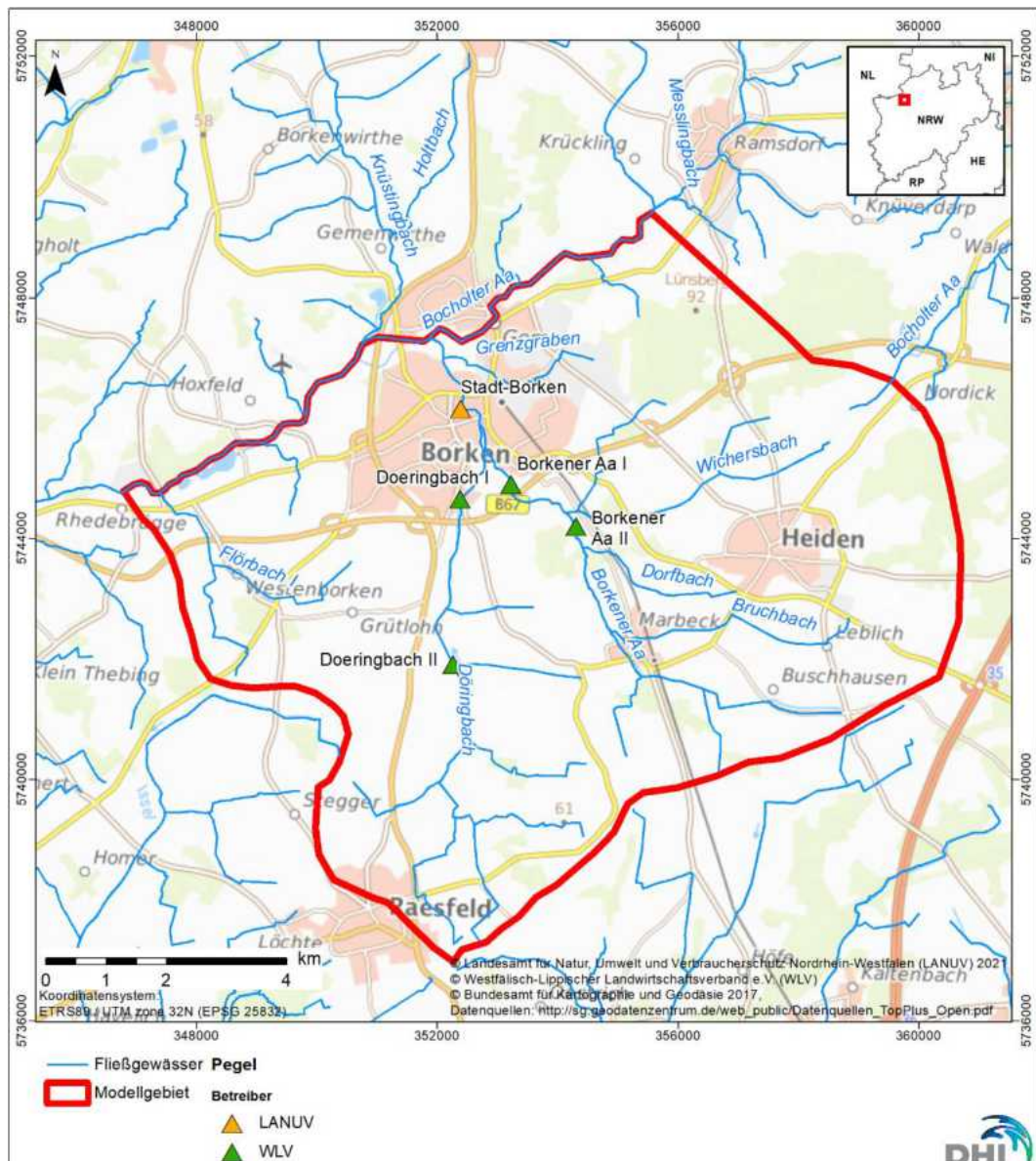


Abbildung 2-5: Pegel an den Fließgewässern innerhalb des Modellgebiets.

2.4.1.1 Wasserstands- und Abflussmessdaten

Behördliche Daten wurden direkt beim LANUV (Tabelle 2-6) angefordert.

Der Stadt-Borken Pegel misst Wasserstände (m NN) und den Abfluss (m^3/s) aus einem Einzugsgebiet von $70,02 \text{ km}^2$ und deckt somit die grobe Mehrheit der $97,2 \text{ km}^2$ großen Modellgebiets ab. Gewässerhöhe und -abfluss wurden kontinuierlich zwischen 1959 und 2021 in 15-minütigen Zeitintervallen gemessen. Laut dem LANUV wurden die Rohdaten ab 2005 nur teilweise bearbeitet.

Tabelle 2-6: Stammdaten des Stadt-Borken Pegels [vom LANUV am 29.06.2023 zur Verfügung gestellt]

Pegelname	Pegel_ID	Betreiber	Gewässer	X	Y
Stadt-Borken	9282490000200	LANUV	Borkener Aa	352399,214	5746153,917

Tabelle 2-7: Statistische Auswertung der hydrologischen Parameter für den LANUV Pegel Stadt-Borken.

Hydrologische Parameter	Min.	Max.	Mittelwert	Monitoring Periode
Wasserstand [m NN]	41,47	42,61	41,62	01.11.2008 bis 01.09.2021
Abfluss [m³/s]	0,016	11,579	0,427	01.11.2008 bis 01.09.2021

2.4.1.2 Pegelsetzungen innerhalb des Projektes

Im Modellgebiet lag lediglich ein Gewässerpegel vor. Demnach wurden während des Projekts weitere Pegel erbaut und bemessen (siehe grüne Dreiecke in Abbildung 2-5 und Tabelle 2-8). Diese haben die Datenlage bezüglich der Gewässer deutlich verbessert und konnten für die Kalibrierung, Verifizierung und Validierung des Modells verwendet werden.

Tabelle 2-8: Verfügbare Pegeldata des Auftraggebers, Messkampagne. [Quelle: vom WLV zur Verfügung gestellt]

Pegelname	Verortung	Gewässer	Rechts-wert	Hoch-wert	Min. [mNN]	Max. [mNN]	Mittel [mNN]
Borkener Aa I	unterhalb Brücke Lohmühlenweg	Borkener Aa	353238	5744900	44.55	45.09	44.71
Borkener Aa II	unterhalb Brücke Fleter Esch	Borkener Aa	354312	5744200	47.66	48.58	47.89
Döringbach I	unterhalb Brücke Marbecker Straße	Döringbach	352391	5744650	44.57	45.25	44.72
Döringbach II	unterhalb Brücke Hungerweg	Döringbach	352268	5741910	48.43	49.12	48.58

Die WLV Gewässer-Messungskampagne startete im Juli 2023. Das Messintervall der vom WLV platzierten Pegel betrug in allen Fällen 15 Minuten.

Alle Messdaten beinhalteten einen einstündigen Fehler in den Frühmorgenstunden des 05.11.2023. Diese wurde einheitlich bereinigt.

2.4.2 Gewässermorphologie und Gewässerausbau

Für das Gewässernetz im Modellgebiet liegen verschiedene Vermessungsdaten (Peildaten, Querprofile und Querbauwerke wie Durchlässe, Brücken oder Wehre) vor, die in Tabelle 2-9 zusammengefasst sind. Diese dienen als Grundlage für den Aufbau des

1D-Abflussmodells in MIKE HYDRO River welches mit dem Wasserhaushaltsmodell MIKE SHE direkt gekoppelt ist.

Tabelle 2-9: Vorhandene Gewässermorphologie.

Gewässer	Vermessungsdaten	Datenquelle
Borkener Aa	Querschnitte der Datenlogger	24.01.2024, WL V
	Querprofile	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
	Hydraulischer Längsschnitt	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
Bruchbach	Querprofile	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
	Hydraulischer Längsschnitt	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
Döringbach	Querschnitte der Datenlogger	24.01.2024, WL V
	Querprofile	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
	Hydraulischer Längsschnitt	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
Grenzgraben	Querprofile	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
	Hydraulischer Längsschnitt	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
Wichersbach	Querprofile	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster
	Hydraulischer Längsschnitt	Sept. 2011, Hydrotec über Bezirksregierung Münster

2.5 Bodenparameter

Für die Bodenparameter lagen die in Tabelle 2-10 zusammengefassten Daten vor.

Tabelle 2-10: Datenbestand der Bodenkartenwerke

Bezeichnung	Datum, Quelle/Geber
Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1:50.000 – Stand Januar 2022 (BK50)	16.02.2023, Geologischer Dienst NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/boden/BK/ISBK50/]
Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200)	16.02.2023, Geologischer Dienst NRW

Abbildung 2-6 zeigt die Bodengruppen nach LUFA. Schwache, lehmige Sande (49%) bis sandige Sande (34%) dominieren die Bodenart des Modellgebiets (siehe Abbildung 2-7).

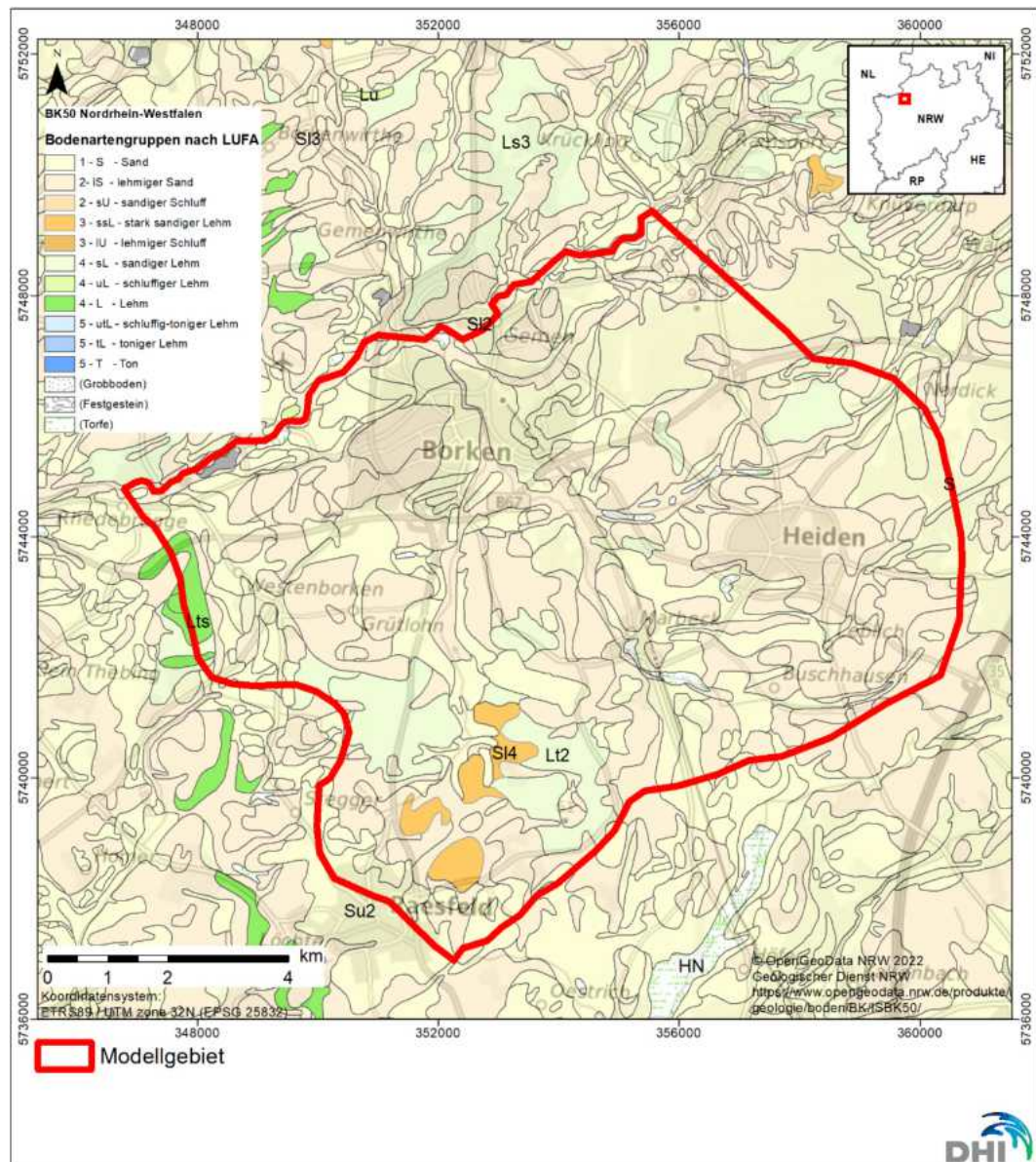


Abbildung 2-6: Bodenübersichtskarte BK 1:50.000 (Quelle: Geologischer Dienst NRW).

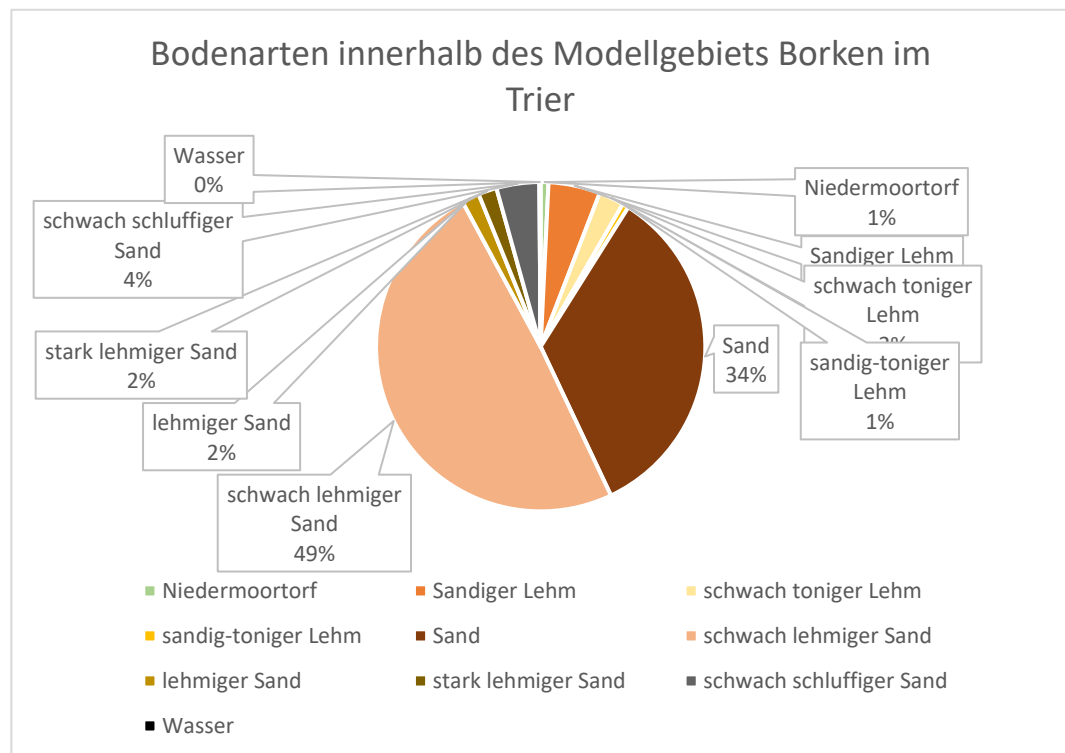


Abbildung 2-7: Bodenarten innerhalb des Modellgebiets Borken im Trier.

Anhand der Bodenarten wurden die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) frei verfügbaren Boden-Leitprofile verwendet, um die Saugspannungskurve und die hydraulischen Durchlässigkeiten des Bodens abzuleiten. Die Saugspannungskurven wurden hierbei mit Hilfe der Rosetta-Datenbank (Pöhler et al., 2007) parametrisiert.

2.6 Hydrogeologie

2.6.1 Geologische und hydrogeologische Kartenwerke

Geologische und hydrogeologische Kartenwerke wurden vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (<https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/geologie/>) bezogen. Es lagen folgende Kartenwerke vor:

Tabelle 2-11: Datenbestand geologische und hydrogeologische Kartenwerke.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25.000. Das Modellgebiet umfasst die Blätter 4105 (Stand: 2008), 4205 (Stand: 2005).	21.02.2023, Geologischer Dienst NRW
Geologische Karte von Preussen 1: 25.000. Das Modellgebiet umfasst die Blätter 4006, 4007 (Stand: 1928); 4106, 4206 (Stand: 1929); 4107, 4207 (Stand: 1930).	27.02.2023 Geologischer Dienst NRW [Analoges Kartenwerk der Geologischen Karte von Preussen (NRW-Abdeckung) 1:25.000]

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100.000 – Stand November 2020	Geologischer Dienst NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/geologie/HK/ISHK100/]
Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:500.000 – Stand Juli 2022	16.02.2023, Geologischer Dienst NRW [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/geologie/HK/ISHK500/]

Mit den genannten Kartenwerken stehen flächendeckend und in guter Qualität Grundlagen für die Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Modellgebiet zur Verfügung.

2.6.2 Geologische Aufschlüsse

Für die Modellbearbeitung lagen die in der Tabelle unten aufgeführten Bohrdaten vor.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
GeoDIN Datenbank im Access Format	09.05.2023, Geologischer Dienst NRW

Für den Import der Bohrungen in die geologische Modellierungssoftware wurden die lithologischen Beschreibungen der Bohrungen anhand der Hauptbestandteile in lithologische Einheiten gruppiert. Insgesamt lagen 4330 Bohrungen vor, die jedoch nicht alle im Modellgebiet liegen (siehe Abbildung 3-1).

2.6.3 Grundwassergleichenpläne

Für das Modellgebiet liegen die folgenden Informationen zu Grundwassergleichenplänen vor (Tabelle 2-12 und Abbildung 2-8).

Tabelle 2-12: Datenübersicht Grundwassergleichenpläne, Flurabstandskarten und Grundwasserkörper.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Grundwassergleichen 1988 des Landes Nordrhein-Westfalen – Stand April 1988 (bzw. 2009)	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/hygrisc/]
Grundwasserkörper Nordrhein-Westfalens – Stand November 2022	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/gw_koerper_2d/]
SPRING-Modell [PDF]	14.04.2023 AQUANTA

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
FEFLOW-Modell [PDF & 2017er Modellversion]	14.04.2023 CONSULAQUA über AQUANTA
Grundwasserflurabstandskarte – Stand April 1988	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/GW/grundwassergleichen_n_1988/]

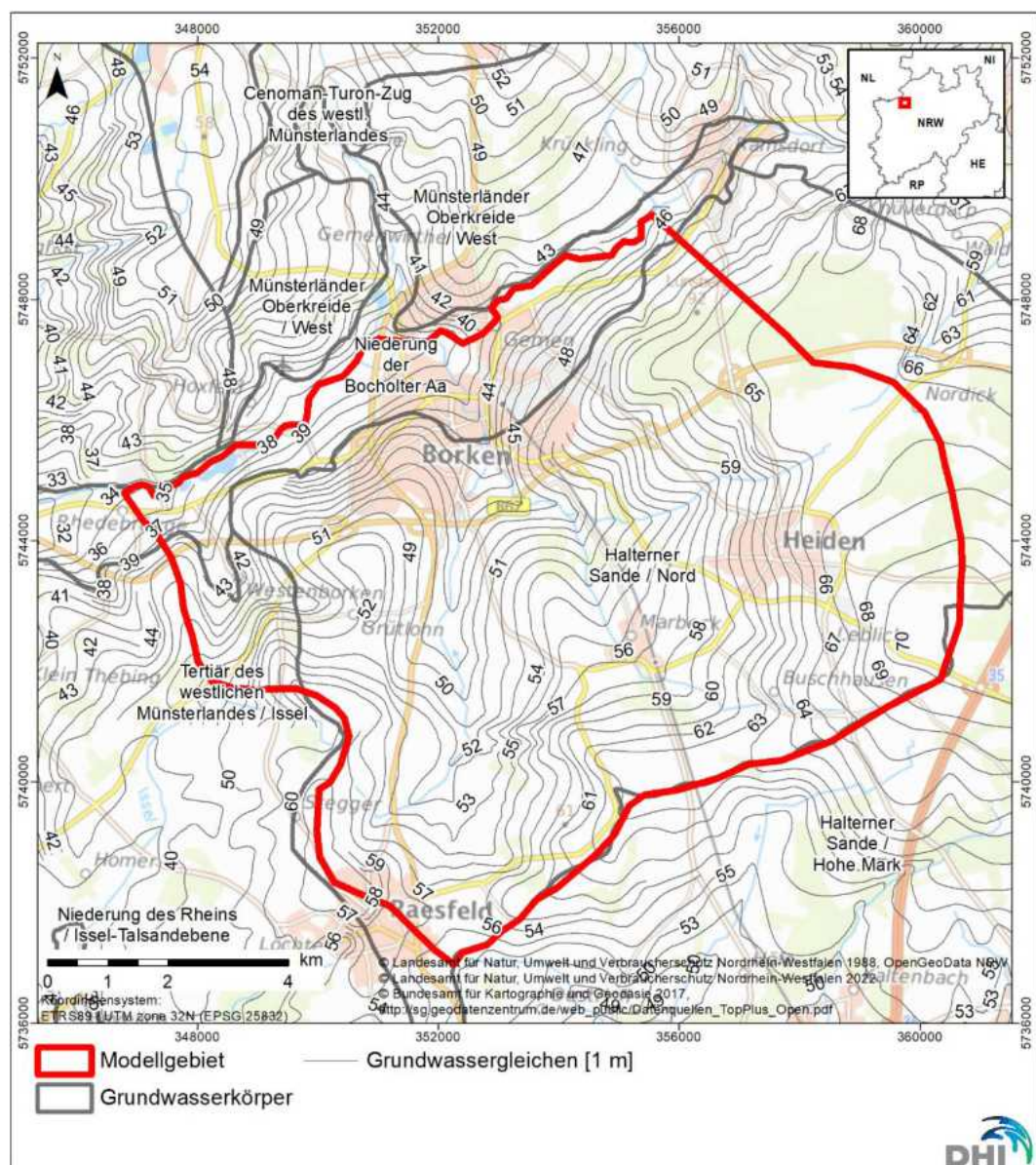


Abbildung 2-8: Modellgebiet mit dem Grundwassergleichenplan und dem Grundwasserkörper [LANUV].

2.6.4 Grundwasserstandsdaten

Die Grundwassermessstellen wurden von der NRW-OpenGeodata und Aquanta gesammelt und dem Modellbereich zugeschnitten. Insgesamt lagen Daten zu 272 Grundwassermessstellen vor. Der Datensatz inkludiert auch inaktive Messstellen. Die mittlere Teufe der NRW-Datensatz-Messstellen beträgt 9.4 m, während die mittlere Teufe der Aquanta-Datensatz-Messstellen bei 43 m liegt. Grundwassermessstellen, die im Modellgebiet liegen sind in Abbildung 2-9 dargestellt, farblich markiert nach Datenquelle.

Tabelle 2-13: Datenstand Grundwassermessstellen.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Grundwassermessstellen des Landes Nordrhein-Westfalen – Stand Oktober 2021	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/hygrisc/]
Grundwassermessstellen von Aquanta (Stammdaten, Ausbautiefe, Filterstrecken, Schichtenverzeichnis) – Stand aktuell	14.04.2023 AQUANTA
Grundwasserstände 2000-2022 SW Borken	14.04.2023 AQUANTA
Grundwassermessstellen des Landes Nordrhein-Westfalen – Stand 2023	04.12.2023 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/hygrisc/]

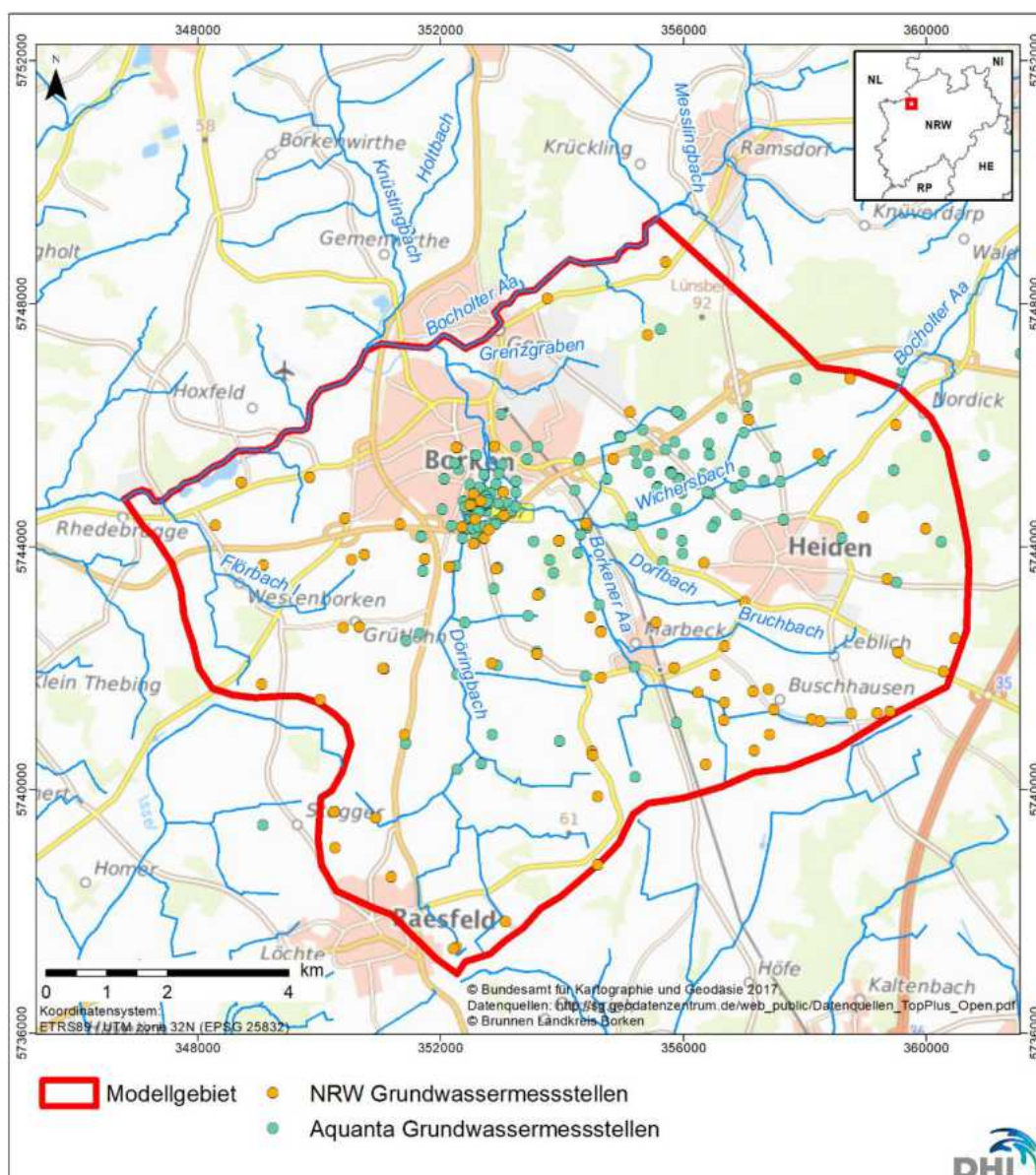


Abbildung 2-9: Übersichtskarte der Grundwassermessstellen (NRW und Aquanta) im Modellgebiet.

2.6.5 Grundwasserentnahmen

Die vorliegenden Daten von Grundwasserentnahmen innerhalb des Modellgebiets sind in Tabelle 2-14 zusammengefasst.

Tabelle 2-14: Datenbestand Grundwasserentnahmen

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Trinkwasserschutzgebiete in NRW – Stand September 2021	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/trinkwasser/tw-

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
	versorgungsgebiete/TW-Versorgungsgebiete-NRW_EPSG25832_Shape.zip]
Grundwasserentnahmen WSG im Trier [.shp] (Koordinaten, Tiefe, Nutzungsart, Jahresfördermenge, erlässliche Förderrate)	7.12.2023, Landkreis Borken
Wasserversorger Entnahmefrünnen (Stammdaten der Brunnen, Ausbautiefe, Filterstrecken, Schichtenverzeichnis)	14.04.2023, AQUANTA
Tagesfördermengen der Grundwasserentnahmenbrunnen der Wasserversorger Borken im Trier und Lammersfeld 2016-2023	31.01.2024, Stadtwerke Borken über AQUANTA
Geupdatete Wasserschutzgebiete Borken im Trier und Lammersfeld	25.01.2024, AQUANTA

Es ist anzumerken, dass für die Grundwasserentnahmen, mit Ausnahme der Wasserversorger, keine tatsächlichen Entnahmemengen vorlagen. Hier finden sich ausschließlich erlaubte Entnahmemengen. D.h. für den Aufbau und die Kalibrierung des Modells, konnten keine tatsächlichen Entnahmewerte angesetzt werden, sondern mussten Annahmen getroffen werden. Aufgrund dieser Datenlage können Unsicherheiten im Modell verbleiben. Zukünftig, für eine etwaige Modellfortschreibung, wären tatsächlich gemessene Entnahmewerte wünschenswert, um die Modellungenauigkeit zu verringern, vor allem die der landwirtschaftlichen Entnahmen.

Im Modellgebiet gibt es sieben, bzw. acht Nutzungsarten von Grundwasserentnahmen (siehe Tabelle 2-15), die sich zusammengerechnet auf rd. 1,6 Millionen Kubikmeter Wasser jährlich erlaubte und 4,7 Millionen m³ bewilligte Entnahmen (Wasserversorger) summieren. Hierbei stellen Grundwasserentnahmen für die öffentliche Wasserversorgung mit rund 75 % den größten Anteil dar, gefolgt von den Entnahmen für die Beregnung mit rd. 23 % aller Entnahmen aus dem Modellgebiet. (Abbildung 2-10). Grundwasserentnahmen für die gewerbliche Landwirtschaft (Viehzucht) sind die drittgrößte Entnahmequelle mit ca. 1,25 % im Modellgebiet, gefolgt von Wasser für die Industrie und Gewerbe sowie für das Gärtnerei und die Fischzucht – mit jeweils deutlich weniger als 1 %.

Tabelle 2-15: Grundwasserentnahme Erlaubnisse und Bewilligungen nach Nutzungsart.

Nutzung	Grundwasserentnahme Erlass [m ³ /a]	Prozentanteil
Öffentliche Wasserversorgung / Trinkwassergewinnung	4.700.000	74,81
Beregnung	1.444.902	23,00
Gewerbliche Landwirtschaft	77.898	1,24
Industrie und Gewerbe	34.343	0,55
Fischzucht	15.768	0,25

Nutzung	Grundwasserentnahme Erläss [m³/a]	Prozentanteil
Gärtnereien	8.337	0,133
Gaststätten	1.000	0,016
Sonstige	4	0,0001
Gesamtsumme	6.282.252	100

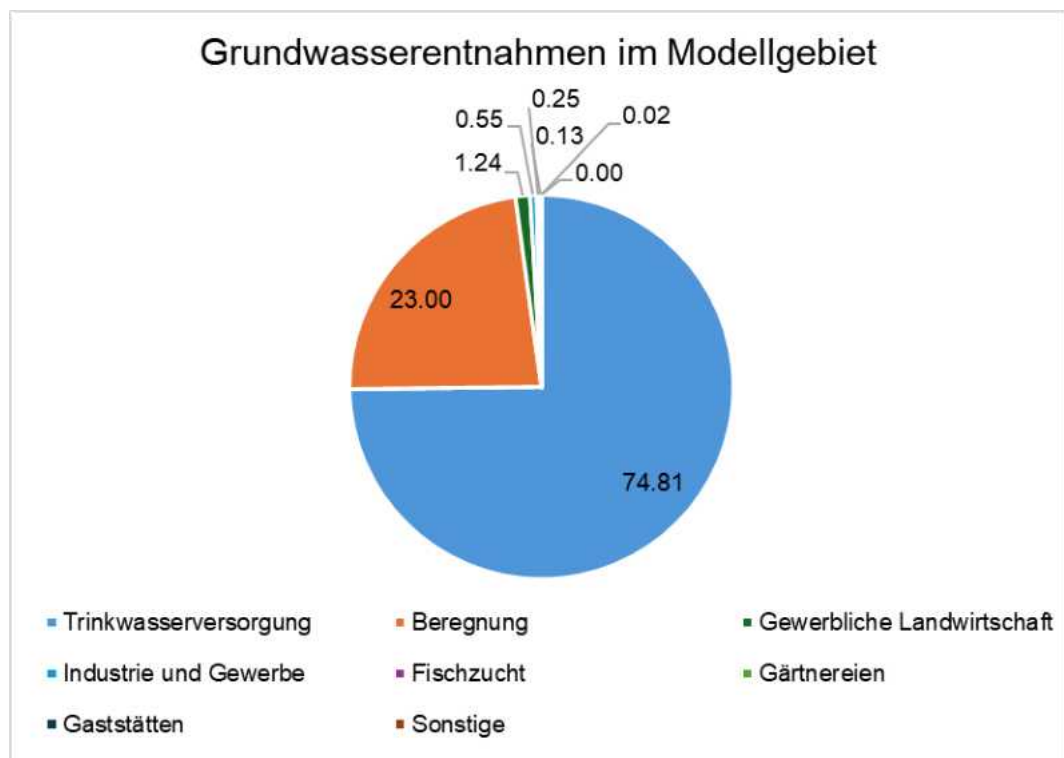


Abbildung 2-10: Grundwasserentnahmen aus dem Modellgebiet.

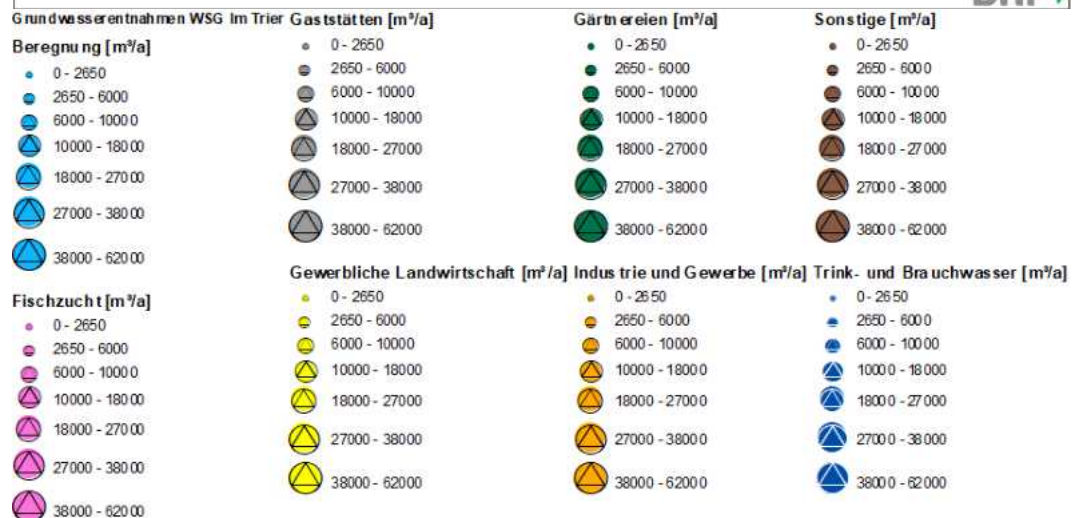
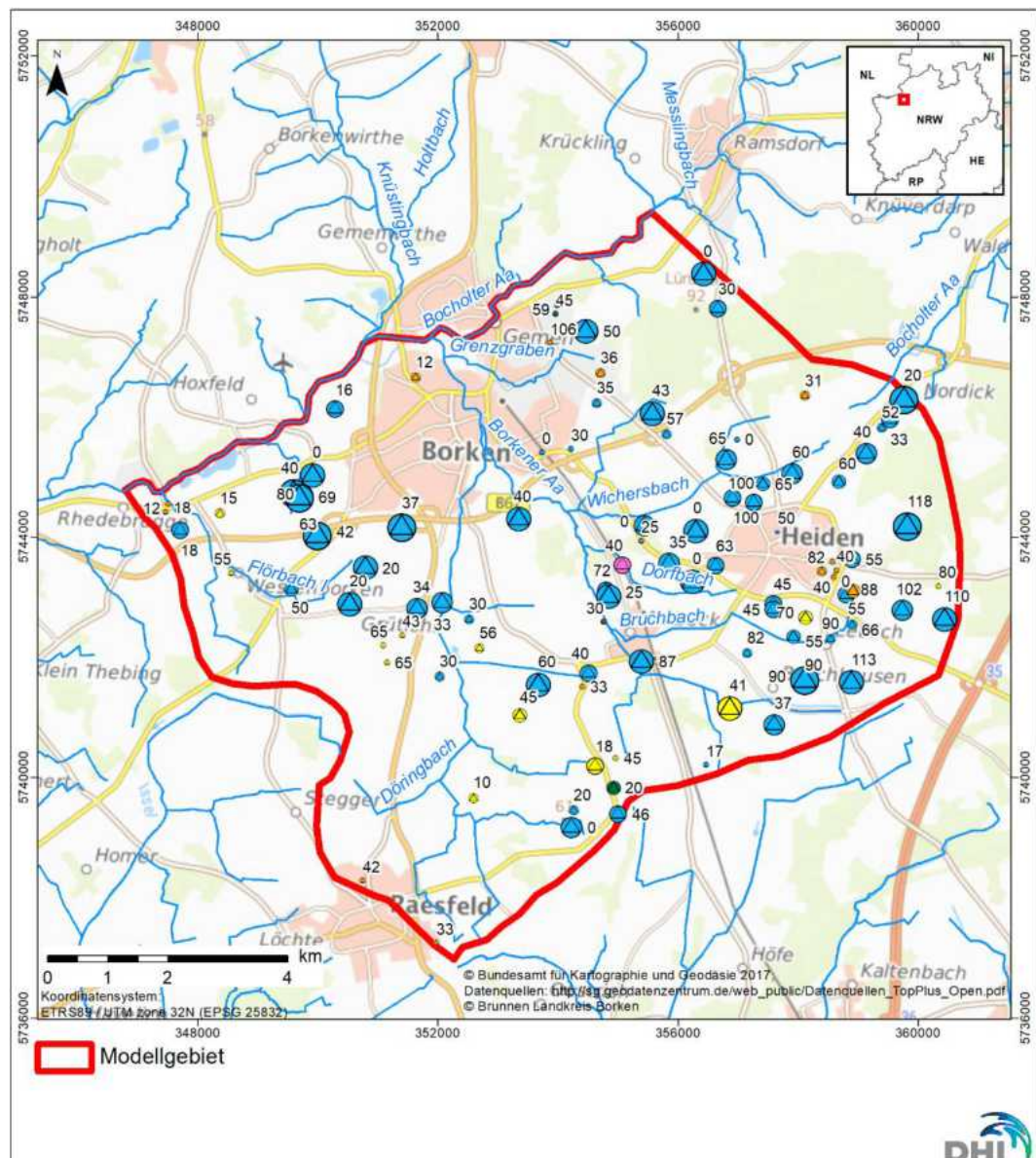


Abbildung 2-11: Grundwasserentnahmen aus dem Modellgebiet nach Nutzungsart – exkludiert Trinkwasserversorger [Landkreis Borken].

Grundwasserentnahmen im Modellgebiet sind somit neben den Entnahmen für die öffentliche Wasserversorgung mehrheitlich der Bewässerung und der gewerblichen Landwirtschaft zuzuordnen.

Manche der Entnahmefrünnen wurden mit unvollständigen Daten von der Unteren Wasserbehörde Landkreis Borken geliefert (Tabelle 2-16). Entweder wurde eine Endteufe des Brunnens als „0“ angegeben, oder die jährlichen erlaubte Entnahmemenge als „0“ Kubikmeter bezeichnet. Im Falle des Letzteren wurden diese Brunnens aus der Brunnenauswahl gelöscht. Im Falle der Ersteren wurde die Endteufe des am nächsten benachbarten Brunnens übernommen.

Tabelle 2-16: Entnahmefrünnen mit fehlerhaften Angaben

Brünnen Nummer	Menge Kubikmeter / Jahr	Brünnen Tiefe [m]	Anpassung
662120/27100	2.000	0	30 m
662120/27212	30.000	0	47 m
662120/31548	30.100	0	30 m
662120/57416	21.820	0	25 m
662120/57675	23.000	0	20 m
662120/54548	0	50	Nicht berücksichtigt
662120/54680	0	80	Nicht berücksichtigt
662120/60143	0	0	Nicht berücksichtigt

Eigenversorgungsanlagen / Hausbrünnen

Im Modellgebiet befinden sich erlaubnisfreie Eigenversorgungsanlagen (Hausbrünnen sowie Tränk- und Prozesswasser der Landwirtschaft), die nicht an das öffentlichen Wasserversorgungsnetz angeschlossen sind. Standorte und Entnahmemengen sind für diese erlaubnisfreien Entnahmen nicht vorhanden.

Die Entnahmemengen werden in dieser Studie nur pauschal bei der Dargebotsbilanzierung einbezogen, aber nicht im Modell direkt. Es ist zu erwarten, dass dadurch die Gesamtentnahme im Modell etwas unterschätzt wird.

Um die über die Hausbrünnen und weitere erlaubnisfreie Eigenversorgungsanlagen innerhalb des Einzugsgebiets der Wassergewinnungsanlage (WGA) entnommene Menge an Grundwasser zu quantifizieren, wurde von der AQUANTA GmbH anhand von Informationen der Stadtwerke Borken für eine frühere Grundwasserdargebotsbilanzierung zunächst die Lage der Hausanschlüsse der von den Stadtwerken versorgten Wohngebäude ermittelt. Bei den anderen Wohngebäuden wurde angenommen, dass sie über eine eigene Wasserversorgung verfügen.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Zahl von drei Personen und einem Pro-Kopf-Verbrauch von 126 l/d wurde so für die innerhalb des Einzugsgebietes der WGA liegenden Hausbrünnen eine jährlich entnommene Menge von rd. 20.300 m³/a ermittelt. Für das WSG wurde durch die UWB des Kreis Borken auf ähnliche Weise eine jährlich entnommene Menge von rd. 27.600 m³ berechnet.

Für die Tierhaltungen wurden Orthofotos ausgewertet und Tierzahlen und deren Verbrauch abgeschätzt.

Wasserversorger

Es gibt zwei Wasserversorgungsanlagen innerhalb des Modellgebietes (siehe Abbildung 2-12): Stadtwerke Borken Westfalen und Stadtwerke Heiden-Lammersfeld. Die Stadtwerke Borken Westfalen verfügen über einen Mengenerlass von drei Million Kubikmeter Wasser jährlich. Dieser Erlass gilt bis 2026. Zurzeit werden jährlich 200.000 Kubikmeter davon an den lokalen Landwirten im Trier für die Beregnung gegeben. Die Stadtwerke Heiden-Lammersfeld können bis 1,7 Million Kubikmeter Wasser jährlich entziehen. Verbal wurde vom Beratungsbüro AQUANTA folgende Information bereitgestellt (25.01.2024). „Bitte beachten Sie, dass in diesem Zeitraum folgende Brunnen durch neue Brunnen ersetzt worden sind:

- FB VII ersetzt durch FB VIIIE, Förderbeginn am 26.09.2023
- FB IX ersetzt durch FB IXE, Förderbeginn am 06.07.2020
- FB XII ersetzt durch FB XIIIE, Förderbeginn am 16.08.2017

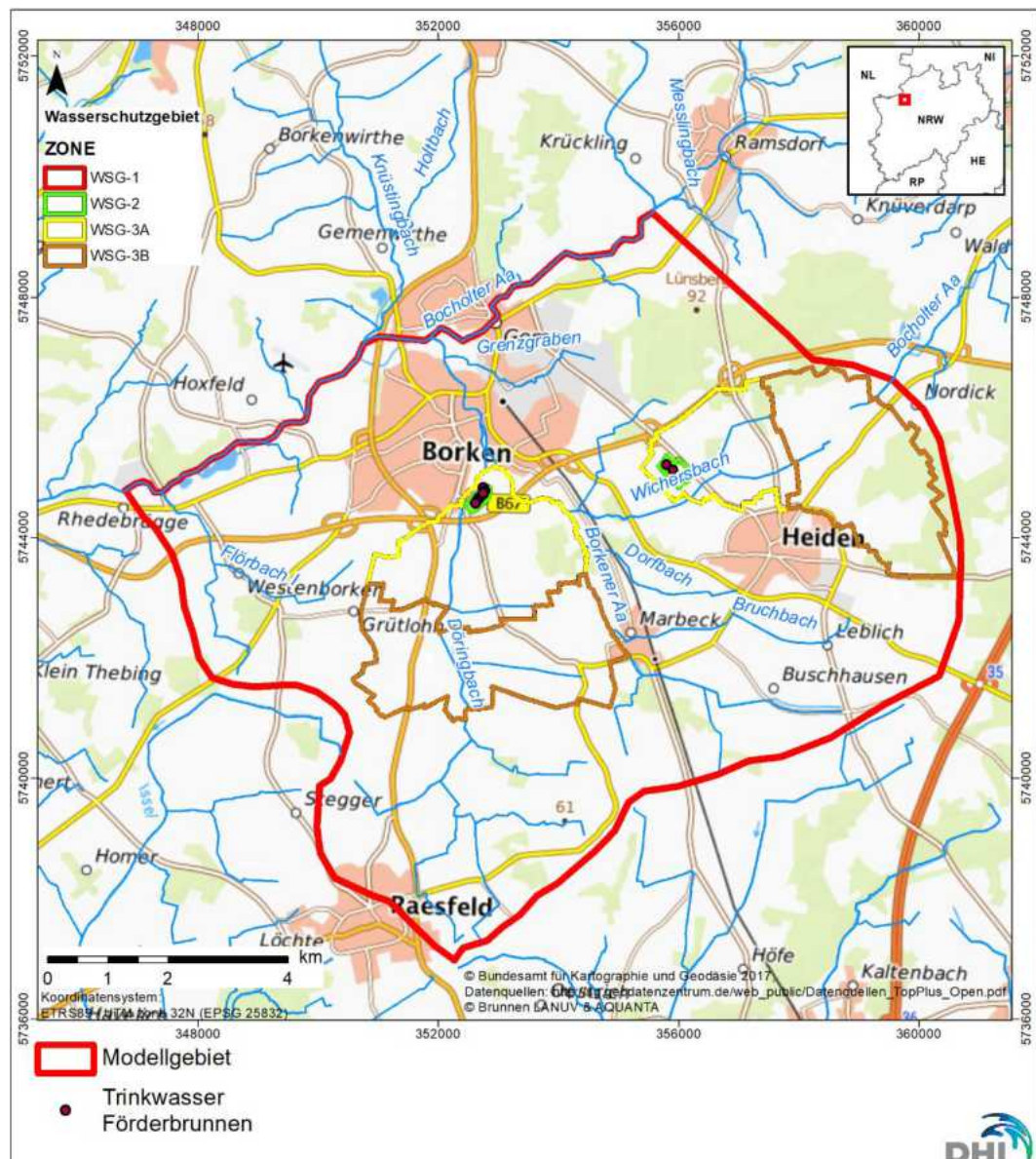


Abbildung 2-12: Lage der Wasserwerke und entsprechenden Wasserschutzgebiete im Modellgebiet.

2.6.6 Grundwasserneubildung

Für den Abgleich der Grundwasserneubildung wurden die Ergebnisse von mGROWA heruntergeladen. Die genaue Quelle kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 2-17: Datenerfassung Grundwasserneubildung mGROWA.

Bezeichnung	Datum, Geber/ Quelle
Grundwasserneubildung mGROWA Langjähriger Mittelwert 1981-2010 – Stand 2019 (gibt es auch mit 1991 – 2020)	16.02.2023, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, berechnet durch FZ Jülich [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/grundwasser/mgrowa/]

3 Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells

3.1 Modellierungssoftware

Die Strukturmodellierung erfolgte mit Hilfe der Software Leapfrog Works 2023.2 (Bentley ehemals Seequent Limited). Leapfrog Works ist ein geologisches Modellierungs- und Visualisierungssystem, welches die 3D-Modellierung von geologischen Schichten anhand verschiedener geologischer und hydrogeologischer Datensätze ermöglicht. Besonderes Merkmal von Leapfrog Works ist die Schnittstelle zu Softwarepaketen für die Grundwassermodellierung (z.B. FEFLOW und MODFLOW) zur direkten Überführbarkeit der geologischen Daten in das Grundwassermodell, sowie die schnelle Verarbeitung und Visualisierung großer Datenmengen. Leapfrog Works verwendet die „Radial Basis Function“ (RBF) zur Interpolation der eingegangenen Daten.

Das hydrogeologische Strukturmodell wurde im Koordinatensystem EPSG 25833 (ETRS89 / UTM Zone 33N) aufgebaut.

3.2 Modellaufbau

Für die Erstellung des hydrogeologischen Strukturmodells wurden folgende Daten verwendet, die in Kapitel 2.6 genauer beschrieben sind:

- Bohrdaten: Es lagen insgesamt 4524 Bohrungen mit Schichtenverzeichnissen vor. Nicht alle dieser Bohrungen befinden sich im Modellgebiet, wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist.

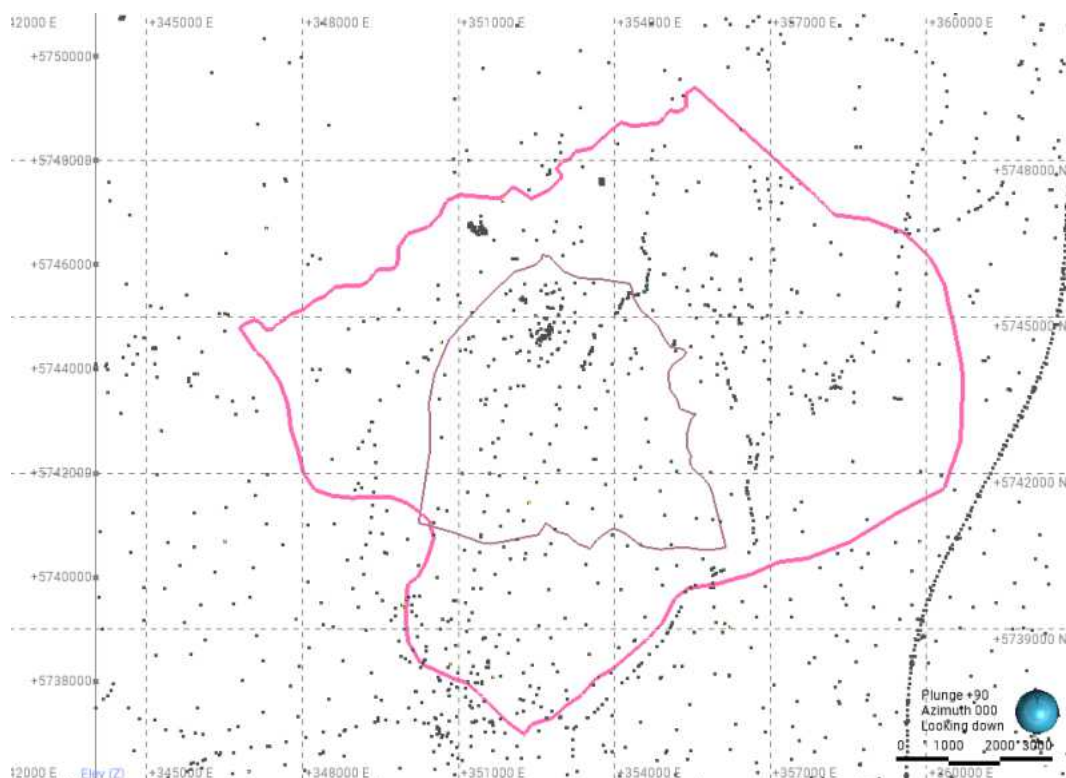


Abbildung 3-1: Verwendete Bohrungen für die hydrogeologische Strukturmodellierung.

- Geologische Profilschnitte: Es lagen zwei geologische Profilschnitte vor Abbildung 3-2.

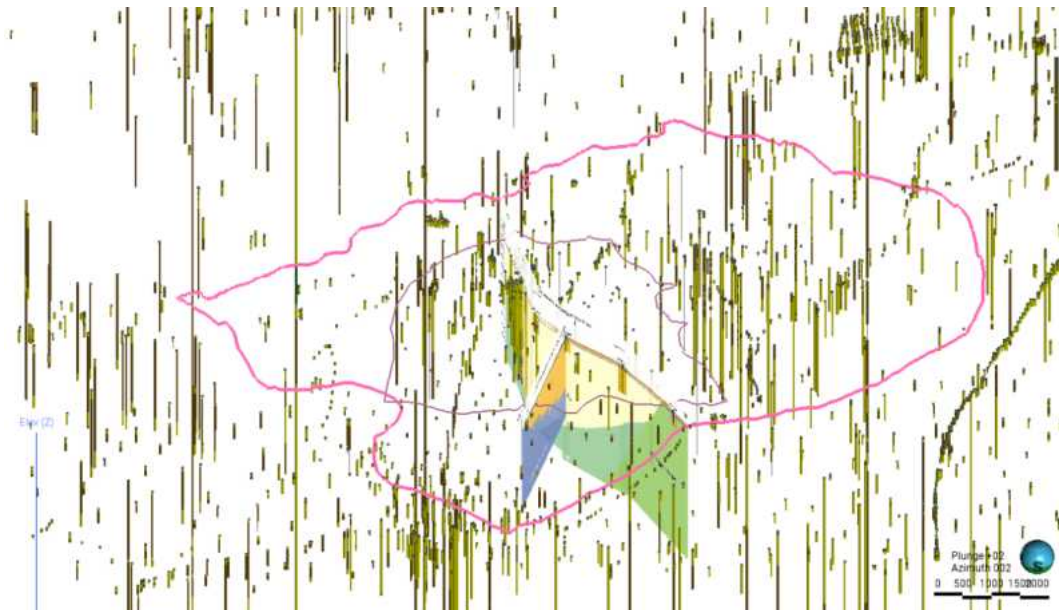


Abbildung 3-2: Darstellung der geologischen Profilschnitte im dreidimensionalen Raum zusammen mit den Bohrprofilen. (20-fach überhöht, Blick nach Nordosten)

- Geologische Karte: Des Weiteren wurde die geologische Karte für die Modellierung der Schichten verwendet Abbildung 3-3.

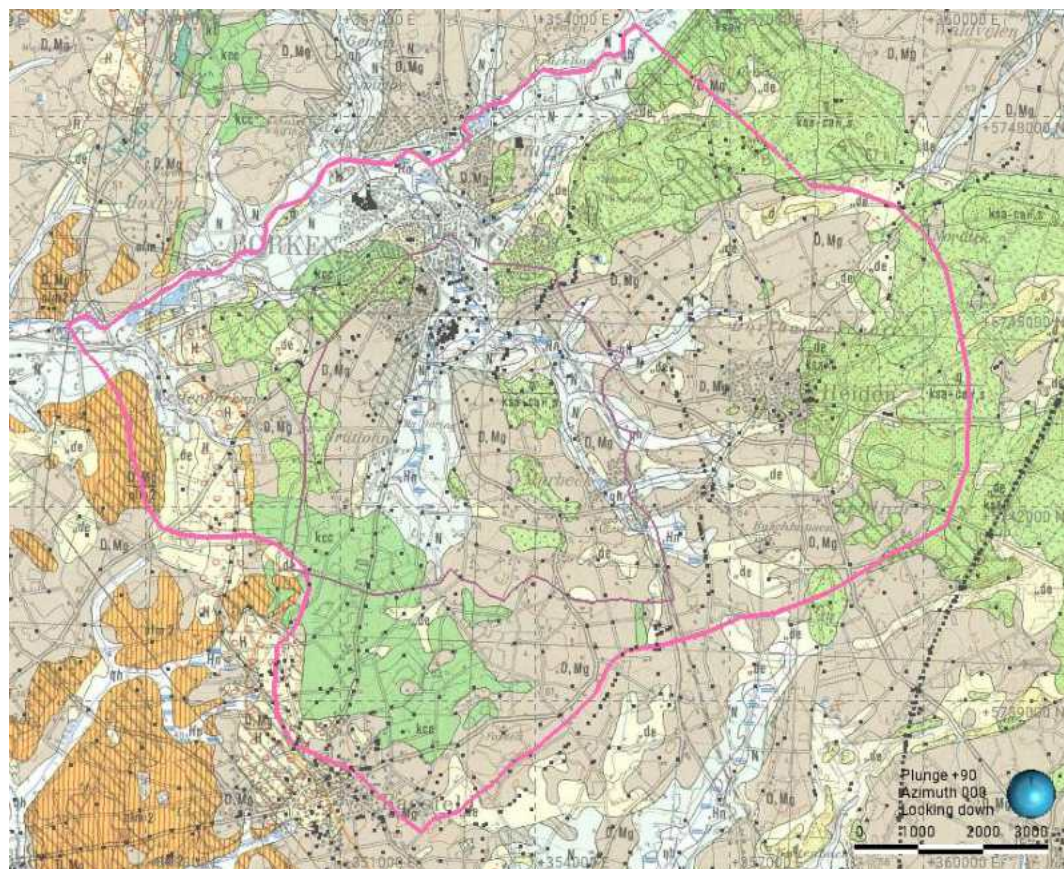


Abbildung 3-3: Geologische Karte.

Aus den oben genannten Informationen konnten geologische Schichten erarbeitet werden. Dabei wurden mit Hilfe der Daten Stützpunkte von geologischen Kontakten erstellt. Anschließend wurde zwischen den Stützpunkten interpoliert. Die Genauigkeit der

geologischen Modellierung basiert auf der Anzahl an Bohrungen und Schnitten. Zwischen diesen Punkt und Linieninformationen verbleibt eine Unsicherheit.

Es wurden insgesamt 3 Schichtpakete und 4 Modellschichten modelliert, die in Tab beschrieben sind.

Tabelle 3-1: Modellierte geologische Schichten und Schichtpakete

Schicht	Beschreibung
Geländeoberkante	Diese bildet die oberste Schicht des Modell.
Unterkante der Deckschicht	Anhand der Bohrprofile wurde die Unterkante der Deckschicht modelliert. Diese Deckschicht ist teilweise mergelig jedoch auch sandig. Mächtigkeit bis ca. 10 m.
Unterkante Grundwasserleiter - Halterner Sande	Anhand der geologischen Profile und Bohrdaten wurde die Unterkante der Halterner Sande erarbeitet. Diese bilden den Hauptgrundwasserleiter und bestehen meist aus Sand bis Kies.
Unterkante des Stauers – Recklinghäuser bzw. Emscher Mergel	Da der Stauer unterhalb des Grundwasserleiters teilweise an der Oberfläche ansteht, wurde dieser durch eine ca. 50 m mächtige Schicht repräsentiert, die parallel zur Unterkante der Halterner Sande verläuft. Der Stauer besteht meist aus Mergel, Schluff, Ton.

Das Ergebnis der hydrogeologischen Strukturmodellierung ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

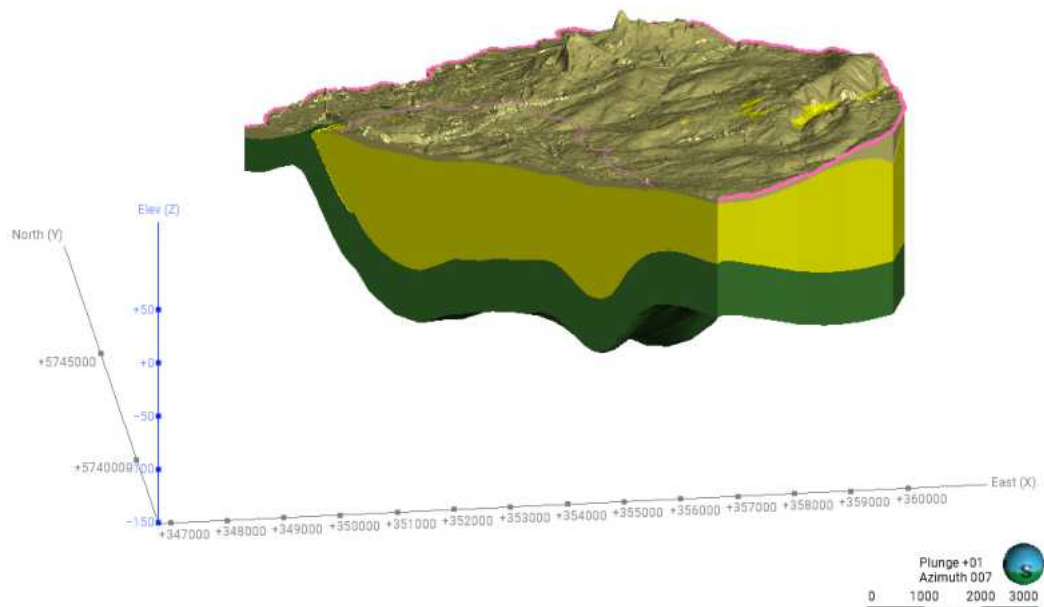


Abbildung 3-4: Dreidimensionale Darstellung des geologischen Strukturmodells. NW-SE Schnitt. Ocker – Deckschicht. Gelb – Halterner Sande. Grün – Stauer.

4 Aufbau des voll gekoppelten Grundwassermodells / Wasserhaushaltsmodell (MIKE SHE)

4.1 Modellierungssoftware

Für den Modellaufbau und die Kalibrierung wurde das Modellsystem MIKE SHE von DHI WASY verwendet. MIKE SHE ist ein rasterbasiertes Wasserhaushaltsmodell, welches alle Kompartimente des Wasserkreislaufs physikalisch berechnen kann. Dabei ist eine Stärke des Modells die hohe zeitliche und räumliche Auflösung.

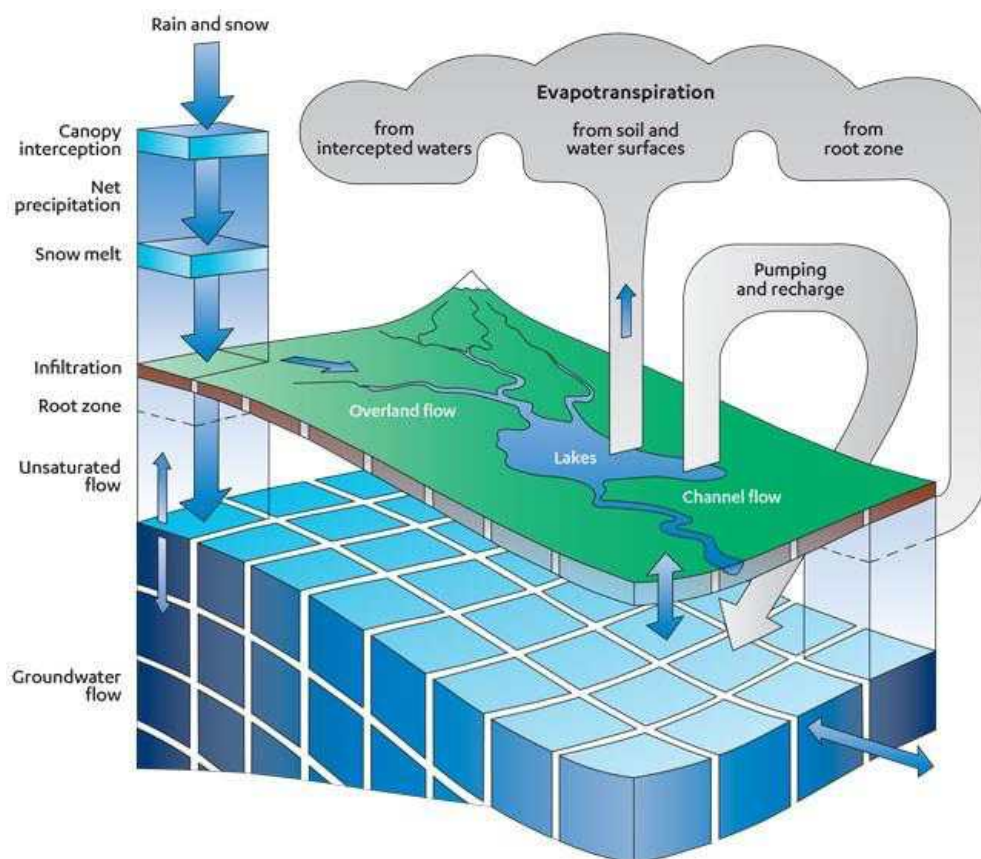


Abbildung 4-1: Modellsystem MIKE SHE mit Beschreibung der berechenbaren Wasserhaushaltskomponenten.

Ein weiterer großer Vorteil des integrierten Modellsystems besteht darin, dass das Grundwasser hier als Teil des Wasserhaushalts verstanden wird und somit eine direkte Verbindung zwischen dem Grundwasser und den hydrologischen Komponenten erfolgt. Dies bedeutet, dass bei der Verwendung von MIKE SHE keine zusätzliche Kopplung (Übergabe von Austauschgrößen) zweier separater Modelle erfolgt. Im Folgenden wird kurz auf den Berechnungsansatz eingegangen:

Tabelle 4-1: Berechnungsansätze in MIKE SHE

Prozess	Numerischer Ansatz
Niederschlag	1-dimensional (Zeitreihen) oder räumlich zeitlich (z.B. Niederschlagsradar)
Schneesmelze	Tag-Grad-Verfahren
Oberflächenabfluss	2-dimensional mit der Flachwassergleichung als Diffusive Welle 1-dimensional Saint-Venant-Gleichungen
Infiltration und ungesättigte Bodenzone	1-dimensional Richards-Gleichung
Aktuelle Transpiration und Evaporation	Kristensen & Jensen
Landnutzung, Bewässerung	2- dimensional unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Blattflächenindex und der Wurzeltiefe
Gesättigte Zone	3-dimensionale Darcy Gleichung (vgl. MODFLOW); Particle Tracking (Vor- und Rückwärts)
Stofftransport	Advektion-Dispersion für alle Module

MIKE SHE gehört zu den sogenannten „White Box“ Modellen. Dies bedeutet, dass das Programm im Gegensatz zu konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modellen nahezu physikalisch, d.h. auf realen Prozessen basierend, rechnet. Dadurch können auch Gebiete mit wenigen gemessenen Daten realitätsnah abgebildet werden. MIKE SHE ist ein anerkanntes Modellsystem, das seit 50 Jahren existiert, kontinuierlich weiterentwickelt und für verschiedensten wasserwirtschaftlichen Fragestellungen angewendet wird (u.a. Moorwiedervernässung, Landesweite Grundwasserneubildung für Dänemark, als Tool für die Grundwasserbewirtschaftung von Grundwasserkörper in den USA oder Erstellung von Niedrigwasserkonzepten). Entsprechend häufig wurde es in zahlreichen Projekten erfolgreich genutzt. Das Programm ist auch in der Lage, Oberflächenabflüsse räumlich verteilt mit einem Diffuse-Wellen-Ansatz (ohne Impulssatz) zu berechnen. Dadurch kann für die hydrologischen Berechnungen eine zusätzliche Kopplung (Übergabe von Austauschgrößen) zweier separater Modelle vermieden werden.

4.1.1 1D - Gewässermodell (MIKE Hydro River)

MIKE Hydro River, als Nachfolger der Software MIKE11, wird für die Berechnung von eindimensionalen Strömungsprozessen eingesetzt. Mit dem Programm können stationäre und instationäre Berechnungen mit dem stabilen und schnellen MIKE1D Rechenkern durchgeführt werden. Dabei werden die Saint-Venant-Gleichungen unter der Berücksichtigung der Massen- und Energieerhaltung sowie des Impulssatzes numerisch gelöst. Die Stärken der Software liegen in der Berechnung von Sonderbauwerken, Retentionsverhalten, Stauflächen, Deichen- und Deichbrüchen und steuerbaren Strukturen. Dabei können auch stark verzweigte Gewässersysteme digitalisiert und sehr detailliert im Modell abgebildet werden. In MIKE HYDRO River können ergänzend die Module zur Berücksichtigung von Sedimentprozessen (ST) und Stofftransport (AD) sowie ein hydrologisches Modell (NAM) verwendet werden.

4.1.2 Kopplung von Gewässer und Wasserhaushaltsmodell

Die Kopplung des 1D-Hydraulikmodells (MIKE Hydro River) mit dem Wasserhaushaltsmodell erfolgt über Austauschflächen, welche entlang der Ränder der MIKE SHE Rasterzellen erzeugt werden. Die Verlinkung von Gewässermodell und Wasserhaushaltsmodell ist schematisch in Abbildung 4-2 skizziert.

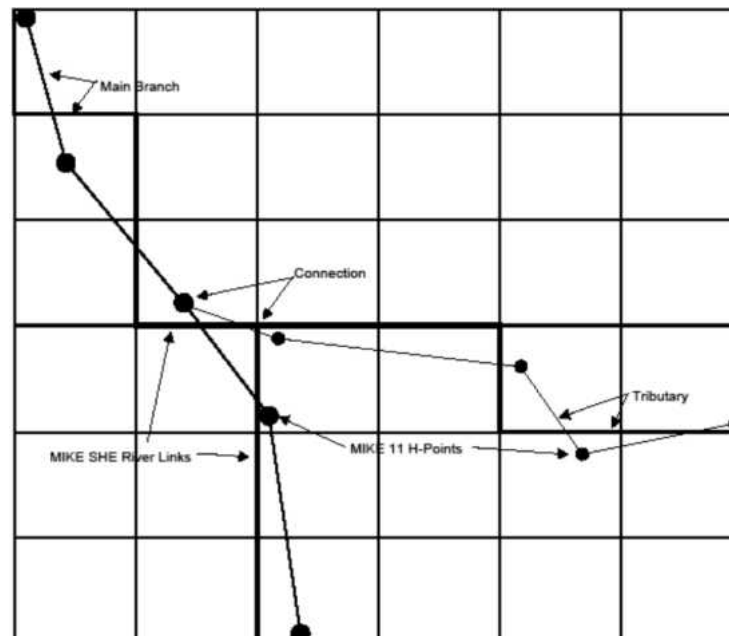


Abbildung 4-2: Schematische Kopplung von Gewässer und Wasserhaushaltsmodell.

Die Kopplung erfolgt über die Verbindungsknoten. Der numerische Ansatz der Kopplung wird im Querschnitt in Abbildung 4-3 dargestellt. Nähere Informationen zur Berechnung sind im aktuellen MIKE SHE Handbuch zu finden.

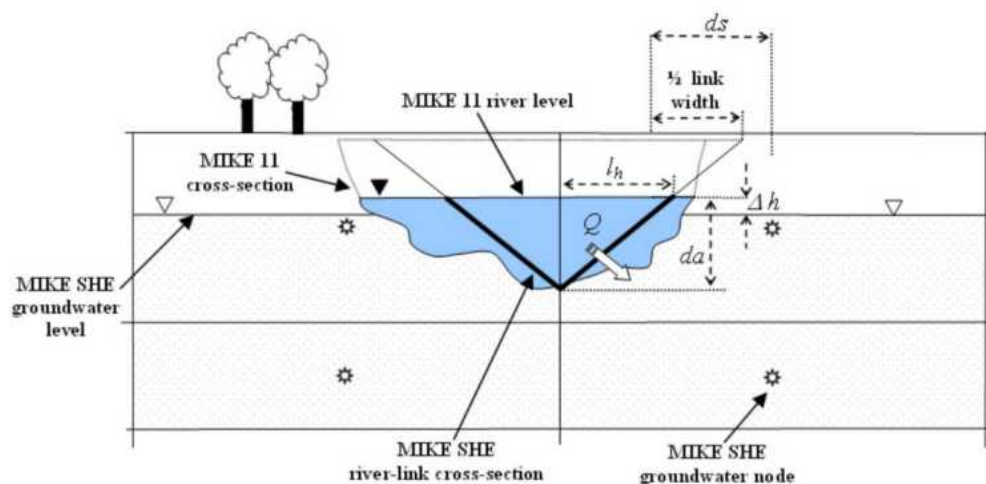


Abbildung 4-3: Vereinfachte Darstellung der MIKE SHE – MIKE Hydro River (neue Version von MIKE 11) Kopplung im Querschnitt.

4.2 Untersuchungsgebiet und betrachteter Zeitraum

Ableitung der Modellgrenzen

Die Abgrenzung des Modellgebietes erfolgte primär auf Grundlage der Grundwassergleichen von 1988 (siehe Tabelle 2-12) mit Berücksichtigung der Topografie. Im Nordwesten wird das Gebiet durch den Vorfluter (Bocholter Aa) begrenzt. Es ist modelltechnisch notwendig, die Randbedingungen so weit entfernt anzusetzen, dass diese den Vorhersagebereich möglichst nicht beeinflussen. Das Modellgebiet ist der Abbildung 4-4 zu entnehmen und umfasst eine Fläche von rund 97,2 km².

In der Abbildung sind ebenfalls die vom Land Nordrhein-Westfalen ermittelten Grundwasserkörper dargestellt. Diese sind, wie man nach einem Abgleich mit den Grundwassergleichen und Fließgewässern erkennt, nach hydrogeologischen Schichten abgeleitet und vernachlässigen im Bereich Borken Strömungsverhältnisse und ober- und unterirdische Einzugsgebiete. Daher konnten die Grundwasserkörper nicht direkt zur Abgrenzung des Wasserhaushaltsmodells übernommen werden. Somit deckt sich das Modellgebiet nicht mit dem Grundwasserkörper.

Berechnungszeitraum

Der Berechnungszeitraum für die vorliegende Analyse umfasst die Jahre 2011 bis 2022. Die Auswahl basiert auf der Verfügbarkeit hydrologischer Daten und gewährleistet die Vergleichbarkeit mit den mGROWA-Daten. Innerhalb dieses Zeitraums werden hydrologische Schwankungen zwischen Trocken- und Nassjahren erfasst, einschließlich des außergewöhnlich trockenen Jahres 2018.

Modelldiskretisierung

Die horizontale Modelldiskretisierung erfolgt mit Rasterdaten, die alle mit einer Auflösung von 5 m Rasterelementgröße im Modell hinterlegt sind. Die hier durchgeführten Berechnungen erfolgen mit einer aggregierten 50 m Rasterelementgröße. Der Vorteil der hochaufgelösten Eingangsdaten besteht darin, dass das Modell zu einem späteren Zeitpunkt mit höher aufgelösten Daten berechnet werden kann, um beispielsweise Detailfragestellungen zu beantworten.

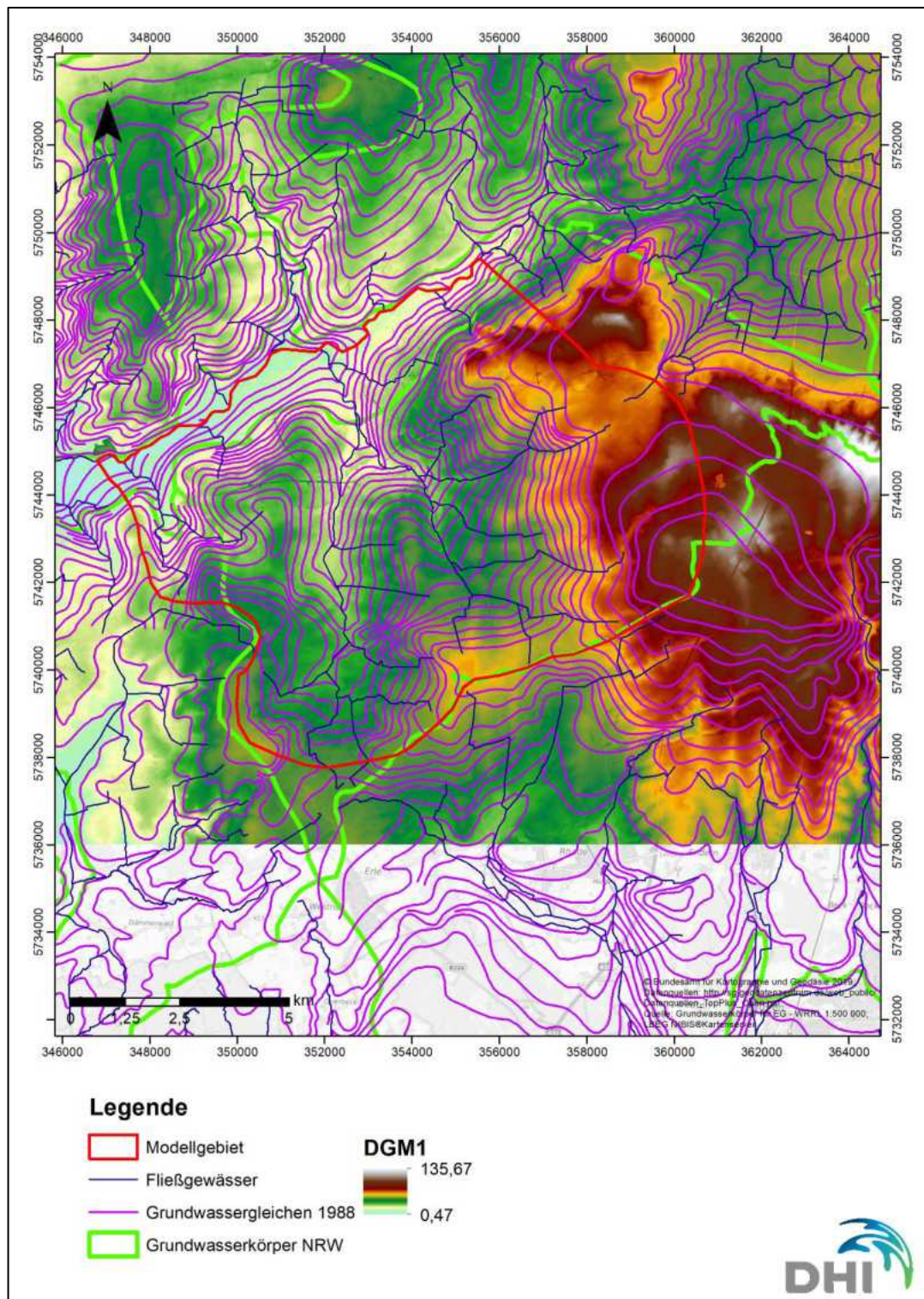


Abbildung 4-4: Abgrenzung des Modellgebiets.

4.2.1 Klimatische Eingangsgrößen

Die wesentlichen Eingangsgrößen für das hydrologische Modell sind der Niederschlag und die potenzielle Verdunstung. Der Niederschlagsdatensatz wurde für jeden täglichen Zeitschritt räumlich mit der *Inverse-Distance-Weighting* Methode zu einem gewichteten Raster mit einer Auflösung von 200 m aufbereitet (siehe Abbildung 4-5). Dadurch konnte

eine graduell verteilte Darstellung der Niederschlagsdaten für das gesamte Projektgebiet sichergestellt werden. Für die genauere Abbildung der Direktabflussprozesse bei Starkregen wurde ebenfalls eine Zeitreihe in zehn-minütigen Zeitschritten heruntergeladen und für das Modell prozessiert.

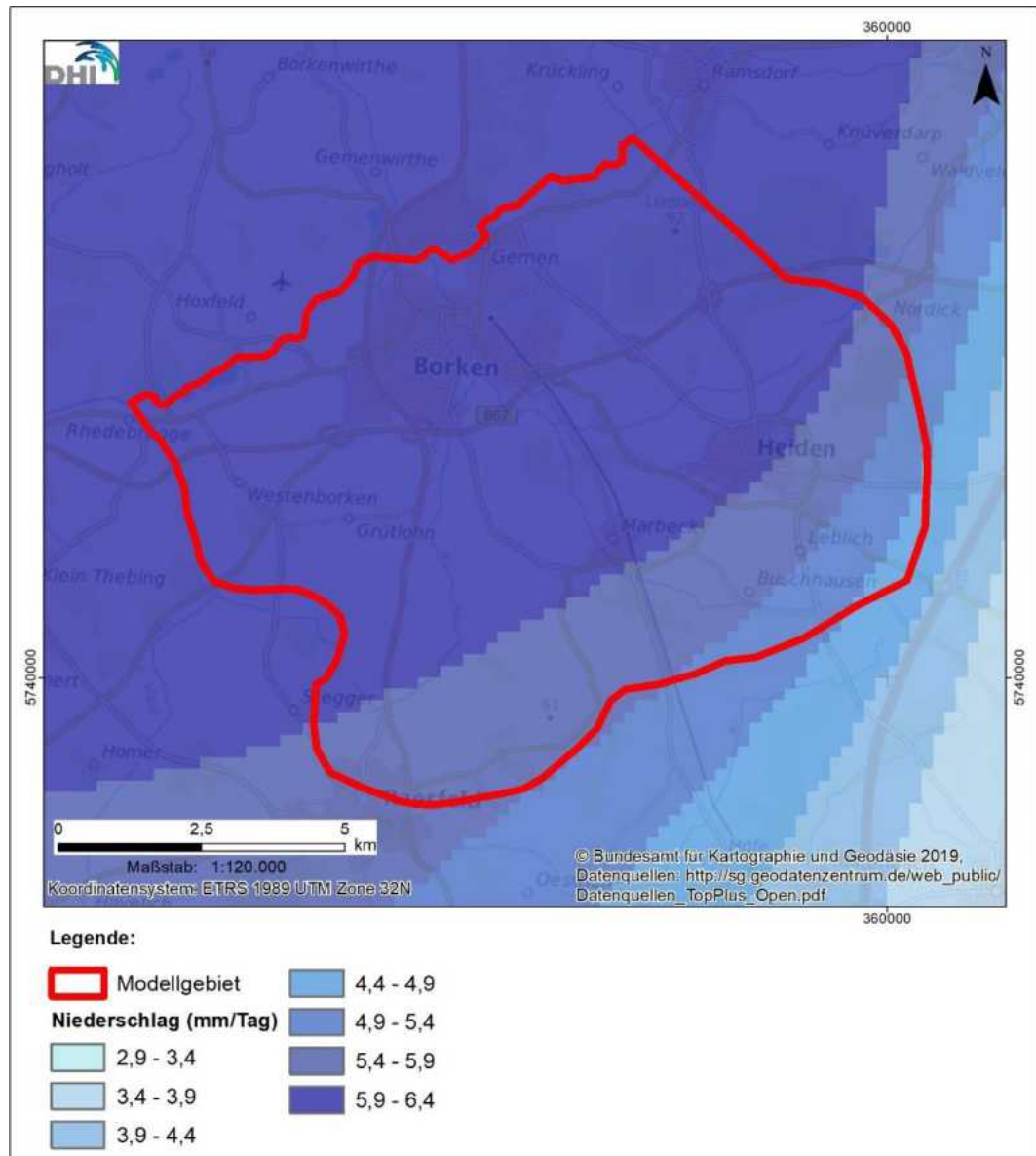


Abbildung 4-5: Beispielhafter Ausschnitt der Zeitreihe des interpolierten Niederschlagsraster.

Die tägliche potenzielle Evapotranspiration wurde für das ganze Modellgebiet einheitlich angesetzt, da nur eine geeignete Klimastation für das Gebiet vorhanden ist.

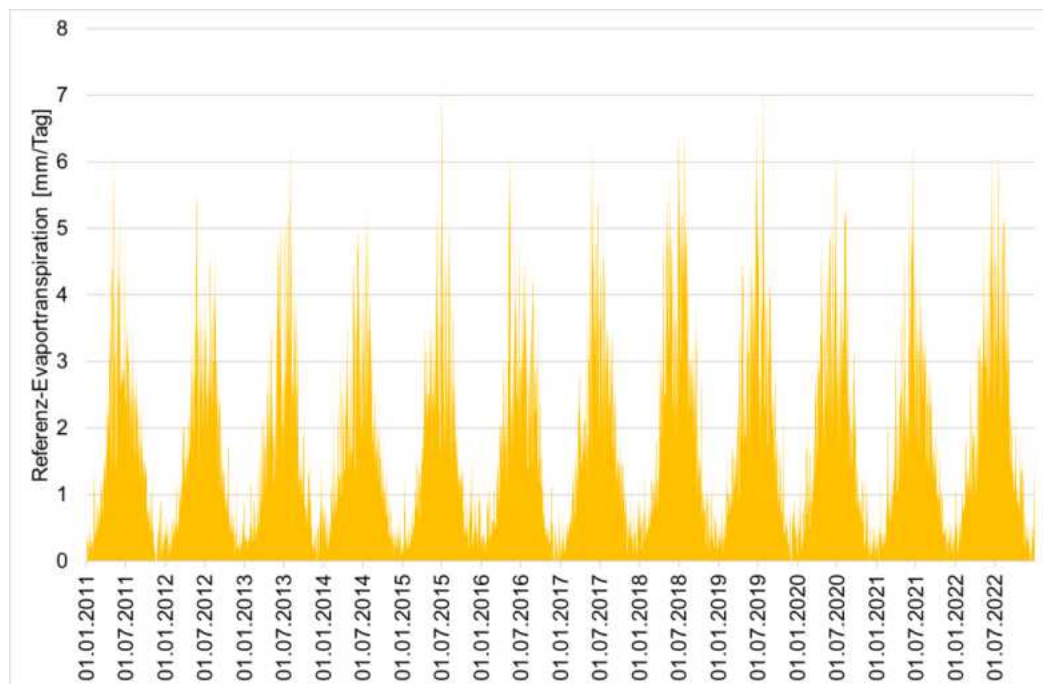


Abbildung 4-6: Gesamte Zeitreihe der Referenz-Evapotranspiration nach FAO-56 der vorhandenen Klimastation (Stationsnummer 617).

4.3 Topografie

Die Geländeoberkante des Modells beruht auf dem 1 m digitalen Geländemodell des Landes Nordrhein-Westfalen (siehe Tabelle 2-1). Das digitale Geländemodell wurde auf eine Auflösung von 5 m vorprozessiert und für das MIKE SHE Modell bereitgestellt. Des Weiteren wurden das digitale Geländemodelle auf Richtigkeit plausibilisiert, unter anderem in Bezug auf Straßen, Bauwerke, und Wasserflächen, und gegebenenfalls manuell korrigiert

4.4 Flächennutzung und Vegetationsparameter

Bundesweite ALKIS Landnutzungsdaten (siehe 2.3 Flächennutzung) wurden auf das Modellgebiet zugeschnitten und für das Modell vorbereitet. Anhand der Flächennutzung können vegetationsspezifische Parameter, und Versiegelungsgrade abgeleitet werden. Im Rahmen der Aufbereitung wurden demnach Landnutzungskategorien erstellt und den Modellteilflächen zugewiesen.

4.4.1 Flächenversiegelung

Die Flächenversiegelung wird über einen Leakage-Beiwert an der Geländeoberfläche räumlich parametrisiert, durch welche die Infiltration gehemmt (gepflasterte Flächen) oder gänzlich verhindert (asphalterte Flächen) wird.

Auf den bebauten Flächen wurde die Infiltration mit einem sehr niedrigen Leakage-Beiwert von 10^{-6} 1/s angesetzt. Im Bereich von Mischbebauung, wie Siedlungsflächen mit lockerer Bebauungsdichte und Grünflächen wurde ein Leakage-Beiwert von 10^{-5} 1/s definiert. Innerhalb von Grünflächen und bewachsenen Zonen wurde keine Hemmung der Infiltration angenommen.

4.4.2 Vegetationsparameter

Die Berechnung der realen Verdunstungsprozesse durch Bodenevaporation und Transpiration der Vegetation basiert in MIKE SHE auf dem Ansatz von Kristensen und Jensen (Kristensen & Jensen, 1975). Hierbei wird die tatsächliche Verdunstung auf Basis der potenziellen Verdunstung abgeleitet. Die Höhe der Verdunstung variiert über das Jahr je nach den pflanzenspezifischen Entwicklungszuständen, welche durch monatliche Zeitreihen der Wurzeltiefe, des Blattflächenindex und ggf. Kulturbeiwert (K_c -Faktor) vorgegeben werden. Für jede Kategorie sind entsprechende Zeitreihen im Modell hinterlegt. Im Folgenden werden drei beispielhafte Zeitreihen von Grünland (Wiese), Landwirtschaft und Nadelwald dargestellt (siehe Abbildung 4-7).

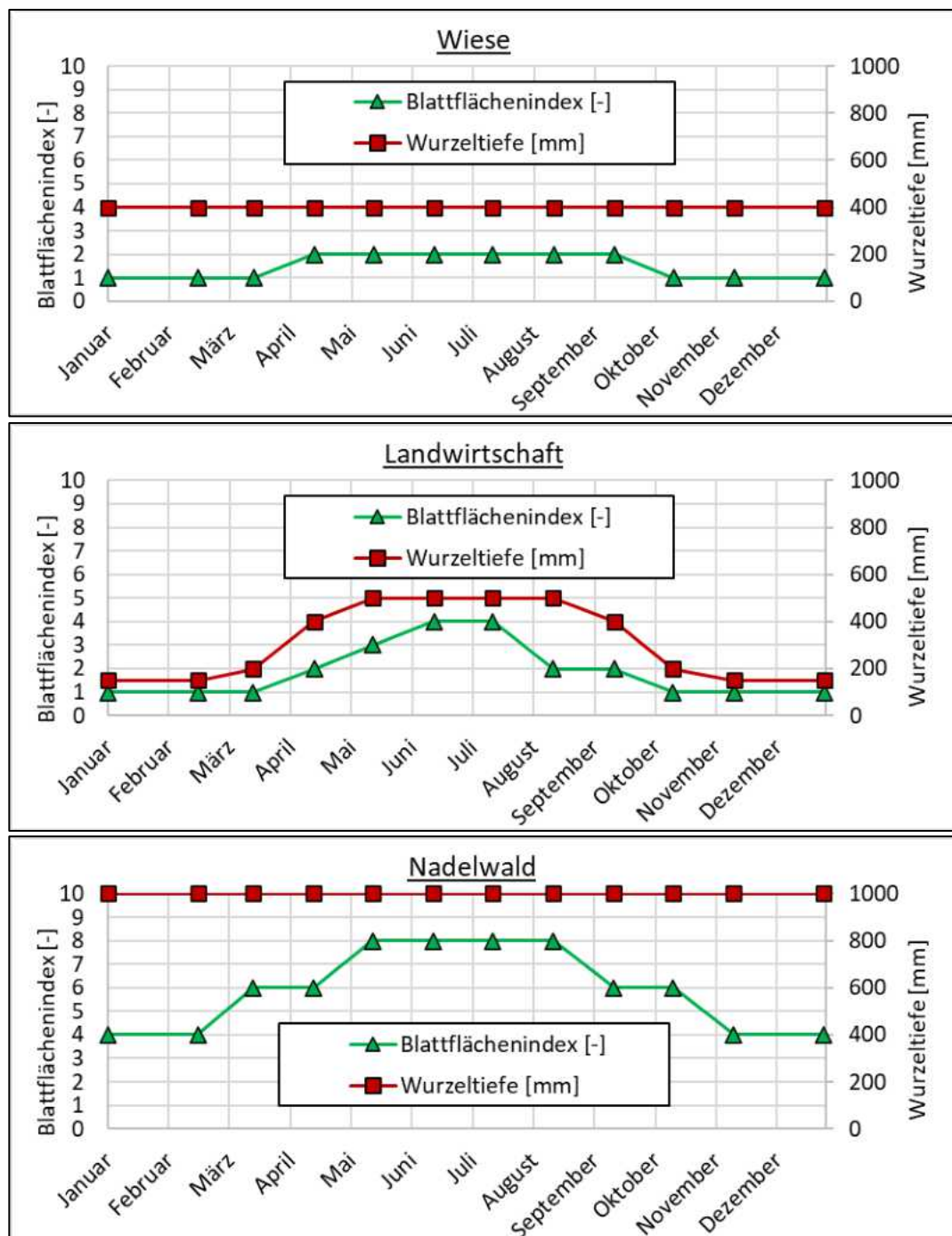


Abbildung 4-7: Beispielhafte vegetationsspezifische Zeitreihen für die Landnutzungstypen Wiese (oben), Landwirtschaft (Mitte) und Nadelwald (unten).

Weitere Parameter für diesen Modellansatz sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Verwendete Parameter für die Verdunstungsberechnung nach Kristensen & Jensen.

Parameter	Wert	Einheit
Canopy interception	0,05	[mm]
C1	0,25	[-]
C2	0,17	[-]
C3	20	[mm/d]
AROOT	0,25	[1/m]

4.5 Grundwasserentnahmen

4.5.1 Trinkwasserversorgung

Für die Brunnen der Trinkwasserversorger lagen tatsächliche Entnahmewerte vor. Diese tatsächlichen Entnahmemengen wurden als Monatswerte im Modell angesetzt.

4.5.2 Gewerbe, Industrie und Sonstige

Es lagen keine tatsächlichen Entnahmewerte für diese Entnahmearten vor. Daher mussten Annahmen getroffen werden.

Vereinfacht wurden im Modell die erlaubten Entnahmemengen angesetzt. Dabei wurden diese gleichmäßig über 12 Monate verteilt, um auf Monatswerte zu kommen.

4.5.3 Landwirtschaftliche Bewässerung

Das Modellgebiet ist geprägt durch landwirtschaftliche Nutzung. Grundwasserentnahmen für eine Bewässerung machen einen großen Teil der erlaubten Entnahmen im Gebiet aus (siehe Abbildung 2-10). Wie in Kapitel 2.6.5 dargestellt lagen keine tatsächlichen Entnahmemengen für die Bewässerungsbrunnen vor. Ebenfalls lagen keine Daten vor, welche Flächen durch welchen Brunnen bewässert werden. Daher musste für die Modellierung eine Methodik entwickelt werden, welche die Entnahmemengen und gleichzeitig die Bewässerungsmengen realitätsnah abbildet.

MIKE SHE verfügt über ein Bewässerungsmodul, welches es ermöglicht verschiedene Bewässerungsmethoden und die Entnahme aus Bewässerungsbrunnen räumlich und zeitlich hochaufgelöst zu rechnen. Die Bewässerungsbrunnen wurden räumlich verteilt in das Modell integriert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Brunnen Grundwasser des obersten Grundwasserleiters entnehmen. Die Entnahmen werden jährlich auf die genehmigte Menge begrenzt und die Bewässerung wurde auf die Monate März bis Oktober begrenzt. Die Zuordnung der Brunnen auf die bewässerten Flächen wurde manuell nach bestem Wissen durchgeführt (siehe Abbildung 4-8). Dabei wurde darauf geachtet, dass die genehmigten Bewässerungsmengen zu den Flächengrößen passen. Es verbleibt jedoch eine Unsicherheit, da Annahmen getroffen werden mussten. Für eine etwaige Modellfortschreibung wären Flächenzuordnungen der einzelnen Brunnen wünschenswert.

In MIKE SHE kann die Berechnungsmenge automatisiert in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte in der Wurzelzone simuliert werden. Hierbei werden spezifische Schwellenwerte für die Bodenfeuchte definiert: Unterschreitet die Bodenfeuchte einen festgelegten unteren Grenzwert, wird die Bewässerung aktiviert; überschreitet sie einen oberen Grenzwert, wird die Bewässerung gestoppt. Da es sich um einen dynamischen Prozess handelt und in der Realität die gesamte Wurzelzone nicht kontinuierlich optimal durchfeuchtet ist, war eine Kalibrierung dieser Grenzwerte erforderlich. Die Kalibrierung erfolgte derart, dass in feuchten Jahren keine Bewässerung stattfindet und in den Trockenjahren 2018 und 2019 etwa 88 % der genehmigten Bewässerungsmengen genutzt werden.

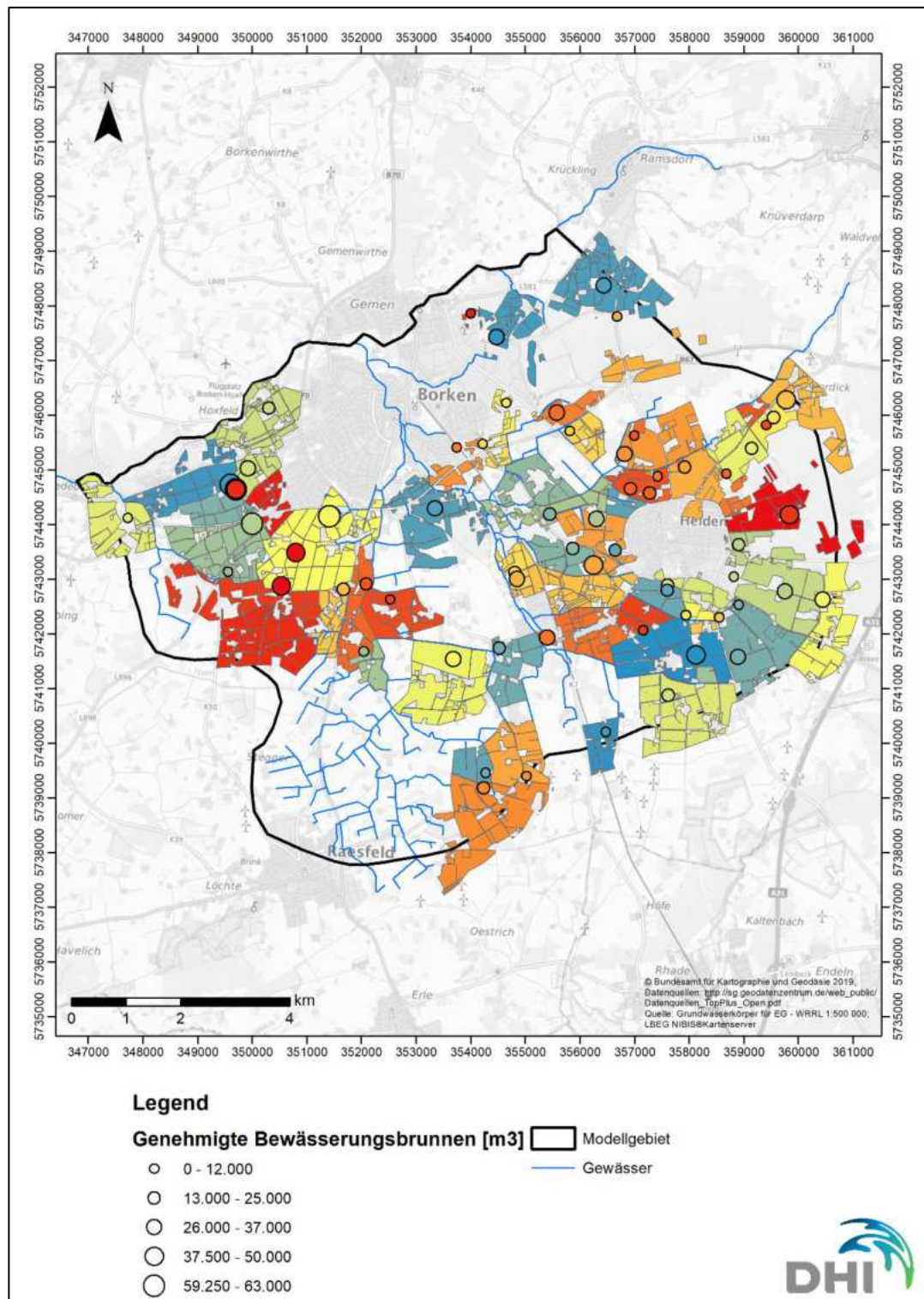


Abbildung 4-8: Manuelle Zuordnung der Bewässerungsbrunnen auf die angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen.

4.6 Oberflächenabfluss

Wasser, welches beispielsweise durch starke Niederschläge oder Überflutung als Oberflächenwasser in den Berechnungszellen des Modells auftritt, wird mit dem

Oberflächenwassermodul berechnet. Der flächige Oberflächenwasserabfluss ist für Fragestellungen zur Überflutungsberechnung durch Starkregen oder Siedlungsentwässerung relevant.

Die Rauigkeit der Oberfläche wird in MIKE SHE über den Manning-Strickler Parameter abgebildet. Hier wird anhand der Landnutzungsklassifizierung unterschieden (vgl. Abbildung 2-2).

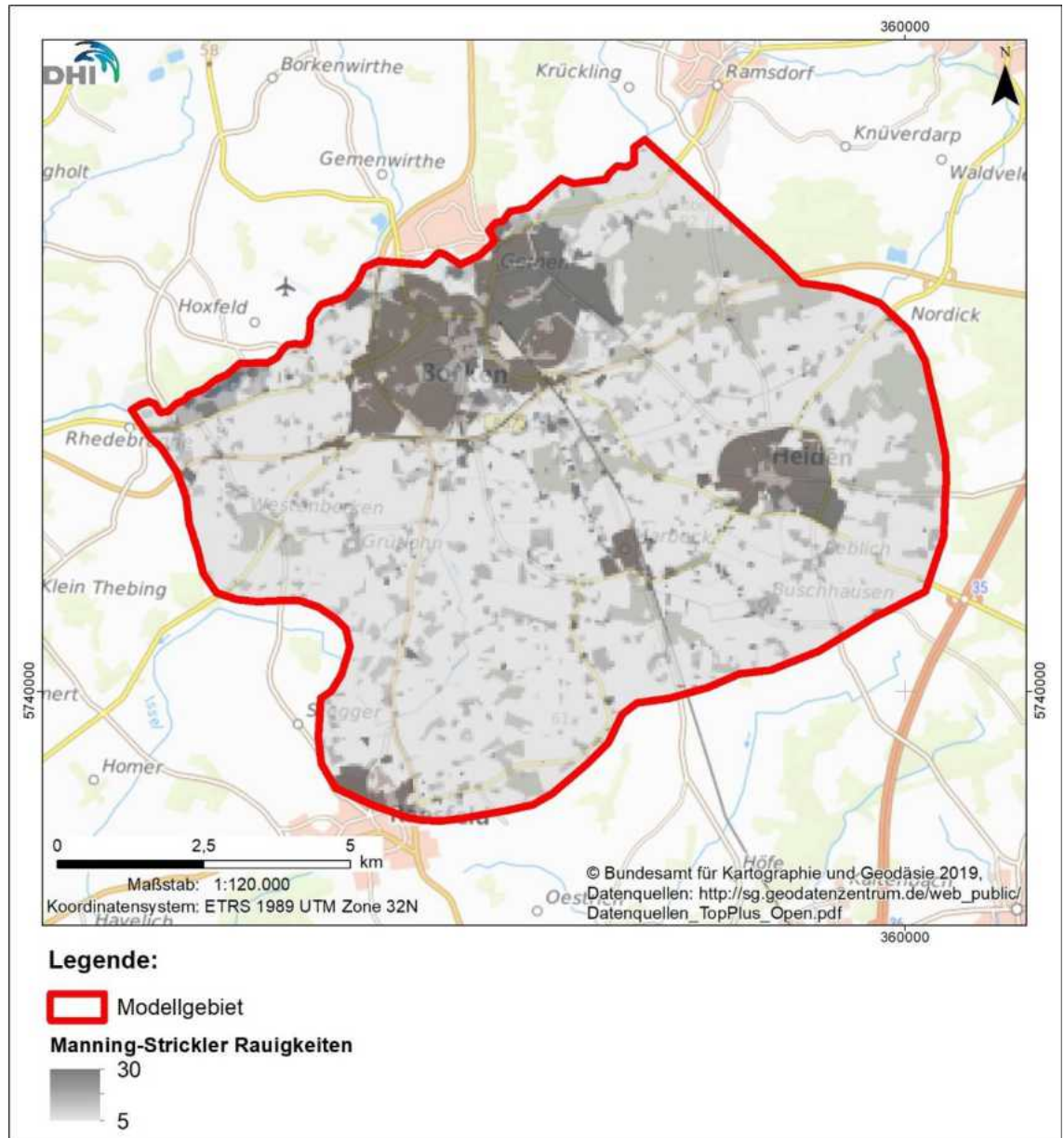


Abbildung 4-9: Räumliche Verteilung der Manning-Strickler Rauigkeiten.

4.7 Gewässermodell

Für die Berechnung der Hydraulik des Gewässersystems für das Modellgebiet wurde ein 1-dimensionales Gewässermodell in der Software MIKE HYDRO River aufgebaut, welches mit dem MIKE SHE Modell gekoppelt wird.

4.7.1 Gewässernetz

Das Gewässernetz wurde anhand der Datengrundlage aus Tabelle 2-5 aufgebaut. Es wurden die in Abbildung 2-4 dargestellten Gewässer/Entwässerungsgräben implementiert.

4.7.2 Gewässermorphologie

Für die Gewässermorphologie wurden, wo vorhanden, Gewässerquerprofile (siehe Kapitel 2.4.2) in das Modell integriert. Zusätzlich wurden vom Auftraggeber zusätzliche Vermessungen an kleineren Gewässern (z.B. Fellerhofgraben) durchgeführt. Diese wurde ebenfalls in das Modell eingearbeitet. Für Gewässer für die keine Gewässerprofile vorlagen, wurde das Profil aus dem DGM1 abgeleitet.

Beispielhaft sind die im Modell integrierten Gewässer in Abbildung 4-10 als Gewässerquerprofil und in Abbildung 4-11 als Längsprofil dargestellt.

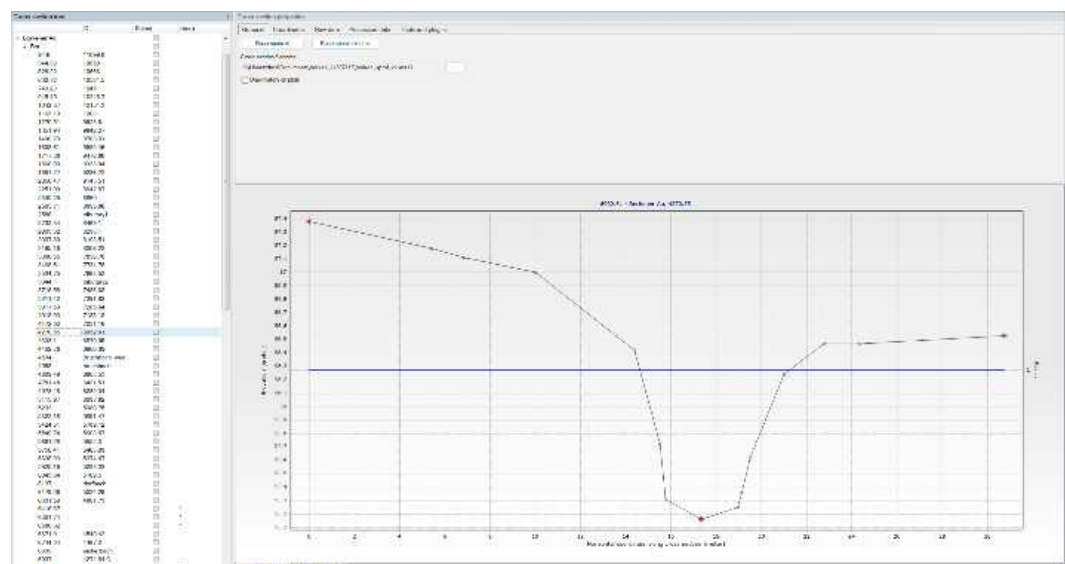


Abbildung 4-10: Exemplarisches Querprofil, welches in das Modell integriert wurde.

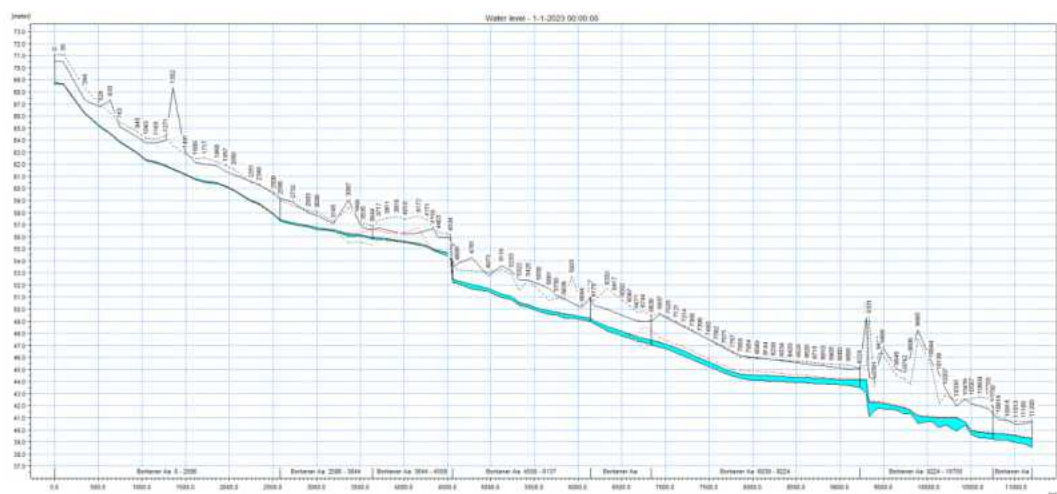


Abbildung 4-11: Exemplarisches Längsprofil, als Resultat aus der Integration der Querprofile.

4.7.3 Bauwerke

Zwei Wehrbauwerke wurden in das Gewässermodell eingebaut. Das Bruchbach-Wehr am Nebenarm der Borkener Aa stellt eine Stauanlage für ein kleines Rückhaltebecken im Bereich von Marbeck dar, oberhalb der Mündung des Bruchbachs. Es handelt sich um ein statisches Wehr, dessen Hauptzweck die Aufrechterhaltung des Stauraums des Engelradingsees ist. Zudem trägt das Wehr zur Stabilisierung des Flusslaufs unterhalb des Staubereichs bei, wo ein signifikanter Höhenunterschied besteht.

Das Döringbach-Wehr am Nebenarm der Borkener Aa befindet sich flussabwärts der Mündung des Döringbachs. Die Struktur verursacht einen deutlichen Höhenabfall und ist im Modell erforderlich, um eine realitätsnahe Abbildung der hydrodynamischen Verhältnisse sowie die Modellstabilität sicherzustellen. Das Wehr ist statisch angesetzt.

4.7.4 Oberflächenwassereinleitungen

Es gibt für das Modellgebiet zwei Arten der Oberflächenwassereinleitungen (siehe Abbildung 4-12):

- direkte Einleitungen von kommunalen Kläranlagen und
- direkte Einleitungen von industriellen Betrieben.

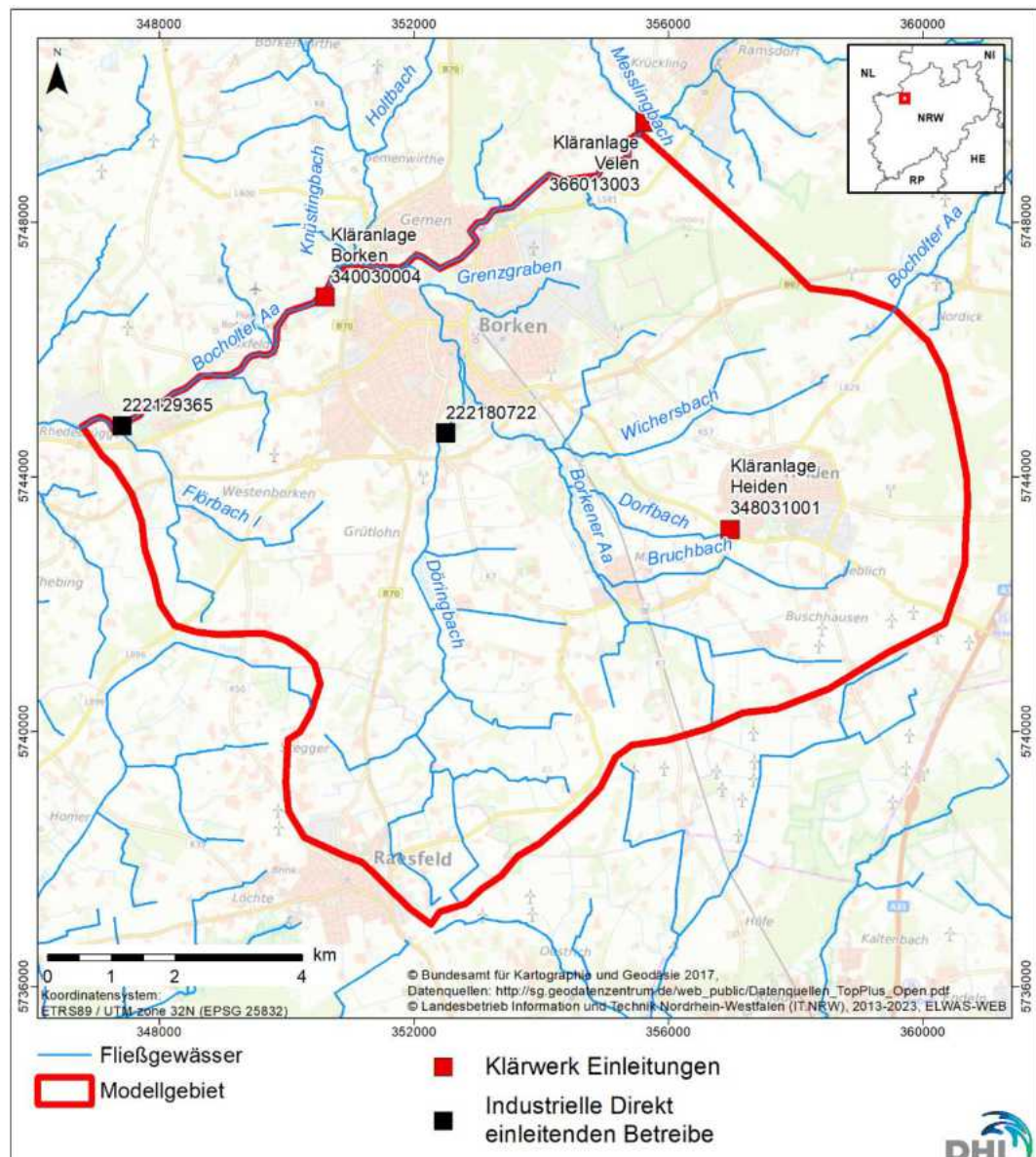


Abbildung 4-12: Einleitungen von kommunalen Kläranlagen und industriellen Direkt einleitenden Betrieben.

Die kommunalen Kläranlagen im Landkreis Borken werden von der Bezirksregierung Münster verwaltet. Die Messdaten der Einleitungen sowie die Abwasserbescheide je kommunale Kläranlage sind der Abbildung 4-13 und der Karte (rote Kacheln) Abbildung 4-12 zu entnehmen. Die Abwasserbescheide für die jeweiligen Kläranlagen und deren Gültigkeiten sind unten aufgelistet:

- Borken Kommunale Kläranlage: 1.420 m³ / 0,5 St [01.01.2022 bis 31.12.2026]
- Velen Kommunale Kläranlage: 380 m³ / 0,5 St [01.06.2019 bis 31.05.2029]
- Heiden Kommunale Kläranlage: 190 m³ / 0,5 St [1.10.2021 bis 30.09.2024]

Tabelle 4-3: Einleitende Kläranlagen

Klär-anlage	AbwAG Nr.	Einleitungs-stellen-Nr.	Erlaubnis-grenze [m³/h]	Ausbaugröße [Einwohner]	Einleitungs-stelle [km]	Gewässer
Borken Kläranlage	340030004	222131057	2.840	140.000	35,97	Bocholter Aa
Velen Kläranlage	366013003	222131077	760	20.000	42,772	Messlingbach / Bocholter Aa
Heiden Kläranlage	348031001	222131062	380	20.000	2,97	Heidener Dorfbach

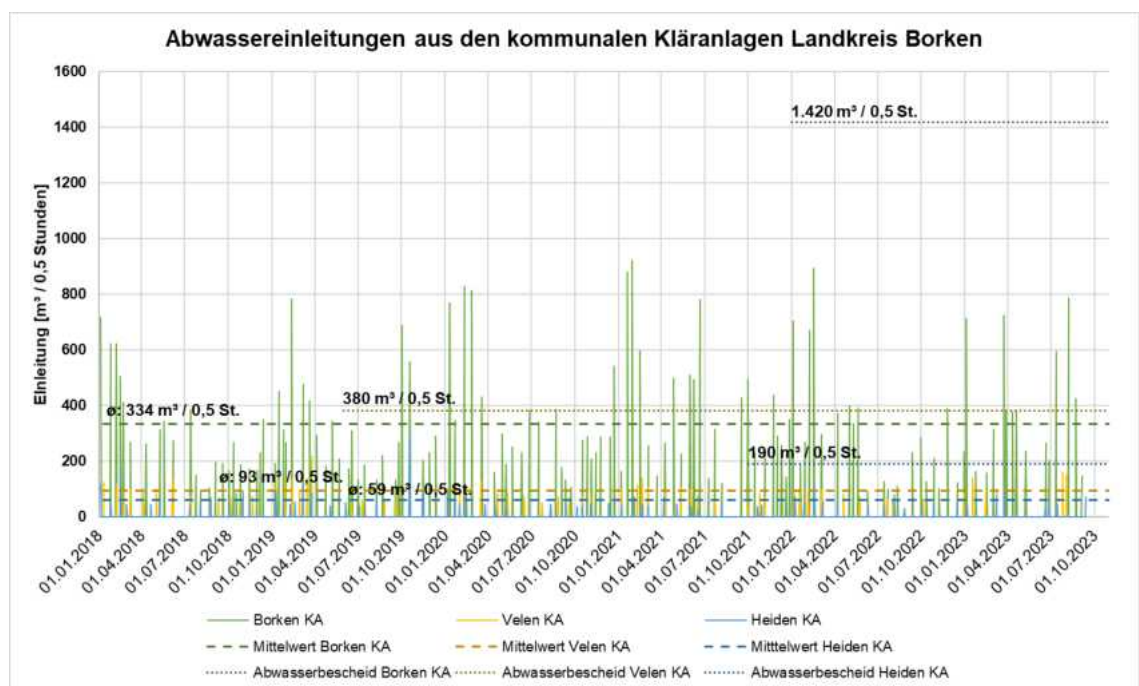


Abbildung 4-13: Abwassereinleitungen der kommunalen Kläranlagen Landkreis Borken – Mess-, Mittelwerte und Abwasserbescheide von 2018 bis 2023.

Die Einleitungen der Kläranlagen wurden als Zeitreihe in Kubikmeter pro Sekunde für MIKE SHE aufbereitet. Außer einem industriellen Betrieb (siehe schwarzer Kachel, Einleitungsstelle-Nr. 5541005) in der Nähe vom Knüstringbach, welcher unter der Zuständigkeit der Unteren Wasserbehörde Landkreis Borken ist, fallen alle weiteren industriellen Betriebe unter der Zuständigkeit der Bezirksregierung Münster. Die Bezirksregierung Münster gibt die Abwasserströme und -mengen bekannt, wenn vorhanden. Die angegebenen Grenzwerte werden als Erlaubnis dem Betrieb zugeteilt und beruhen auf Schätzungen aus den Betriebsprozessen, welche nah an dem Betriebsprotokollen liegen.

Erhältliche Daten über eingeleitete Abwassermengen der direkt-einleitenden industriellen Betrieben sind der Tabelle 4-4 zu entnehmen.

Die Stadtwerke Gescher (Einleitungsstelle-Nr. 222181547) und die Stadtwerke Borken (Einleitungsstelle-Nr. 222180722) in Abbildung 4-12 leiten in deren entsprechenden Grundwasserkörper. Die Stadtwerke Gescher leiten in den Grundwasserkörper Münsterländer Oberkreide, West. Die Stadtwerke Borken leiten in den Haltener Sande.

Tabelle 4-4: Direkteinleitung industrielle Betriebe.

Industrielle direkt-einleitende Betriebe	AbwAG Nr.	Einleitungsstellen-Nr.	Erlaubnisgrenze	Stationierung [km]	Gewässer
Stadtwerke Borken Westf. GmbH Wasserwerk im Trier	340545002	222180722	k.A.	k.A.	Grundwasser (GWK: Halterner Sande / Döringbach)
Sickerwasser aus Bauschuttdeponie Borken-Hoxfeld (Kontrollschacht S137)	k.A.	222129365	800 m³/a	31,864	Bocholter Aa

Auf Nachfrage bei den Stadtwerke Borken Westf. GmbH (Wasserwerk Im Trier) wird kein Filtrerrückspülwasser in den Döringbach eingeleitet. Dies stellt nur eine Option für den Notfall bzw. bei Bedarf dar (Grannemann Bez Reg Münster 25.01. E-Mail).

4.8 Ungesättigte vertikale 1-D Sickerwasserströmung in der oberen Bodenzone

Böden werden in MIKE SHE sowohl räumlich als auch über die Tiefe in hohem Detailgrad abgebildet. Dabei bietet die Bodenkarte 1:50.000 von Nordrhein-Westfalen (BK50) die höchste verfügbare räumliche Auflösung. Diese liefert allerdings keine Informationen über die Bodenhorizonte. Daher wurde ebenfalls die BÜK200 miteinbezogen, da hier Leitprofile mit exakten Bodenschichten verfügbar sind. Damit die hohe räumliche Auflösung der BK50 und die Tiefeninformation der BÜK200 genutzt werden kann, wurden beide miteinander abgeglichen. Aus dem Abgleich wurde eine individuelle Bodenverteilung ermittelt, welche beide räumlichen Ausdehnungen einbezieht. Dabei sind insgesamt 14 Bodentypen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) für das Modellgebiet kategorisiert worden. Jeder Bodentyp weist unterschiedliche bodenkundliche Parameter auf, die maßgebend für sowohl die Aufnahme des Oberflächenabflusses in den Boden (Infiltration) als auch für den Kapillaraufstieg sind.

4.8.1 Vertikale Diskretisierung der Modellschichten

Die ungesättigte Zone wird in MIKE SHE 1-dimensional durch Lösung der Richards-Gleichung berechnet. Die vertikale Modelldiskretisierung der ungesättigten Zone erfolgt tiefenabhängig und ist in der nachfolgenden Tabelle 4-5 aufgelistet. Die oberflächennahen Modellschichten müssen aufgrund der stärkeren Dynamik höher aufgelöst abgebildet werden.

Tabelle 4-5: Vertikale Modelldiskretisierung der ungesättigten Zone.

Anzahl Berechnungsschichten	Schichtdicke [m]
2	0,05
2	0,1
191	0,2

4.8.2 Parametrisierung der Hauptbodenarten

Die Parametrisierung erfolgt nach der Kategorisierung der Bodentypen der BÜK200, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) frei verfügbar ist. In MIKE SHE werden Böden anhand ihrer Saugspannungskurven und hydraulischen Leitfähigkeitskurven nach Van-Genuchten parametrisiert. Für die Herleitung dieser wird die Rosetta-Datenbank (Schapp, Leij, & van Genuchten, 2001) genutzt. Exemplarisch ist in Tabelle 4-6 eine Parametrisierung aufgeführt.

Tabelle 4-6: Exemplarische Parametrisierung des weitverbreiteten schwach lehmigen Sand.

Schicht	Ss	Sr	alpha	n	Ks
SI2 (Ld3): 0 – 100 m	0.3831	0.0409	0.0397	1.6249	9.891e-06

4.9 Gesättigte 3-D Grundwasserströmung

4.9.1 Geologie

Der Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells ist in Kapitel 3 beschrieben.

Die modellierten Schichten wurden aus Leapfrog exportiert und in MIKE SHE importiert. Somit sind die geologischen Informationen aus dem hydrogeologischen Strukturmodell in das MIKE SHE Modell übertragen worden.

4.9.2 Randbedingungen

Das Modellgebiet wurde anhand der Grundwassergleichen und des Gewässernetzes festgelegt (siehe Kapitel 4.1). Im Westen, Süden und Norden sind Nullfluss-Randbedingungen angesetzt, da hier entlang der Grundwasserscheide abgegrenzt wurde. Im Norden ist das Gebiet durch die Bocholter Aa begrenzt. Dort wird das Gewässer mit Austausch mit dem Grundwasser zur Randbedingung.

4.9.3 Drainierte Flächen

Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurden Drainagen großflächig installiert, um Flächen für die landwirtschaftliche Nutzung zu erschließen. Es gibt generell nur wenige Informationen darüber, wo genau und in welcher Tiefe Drainageleitungen verlaufen. Das Modellgebiet ist stark geprägt von landwirtschaftlicher Nutzung. Es bestehen einige Gräben, durch welche das Gebiet großflächig stark entwässert wird. Es gibt jedoch keine belastbaren Informationen dazu, ob lokal zusätzlich Drainageleitungen verlegt wurden oder noch intakt sind.

Das mGROWA-Modell (LANUV Fachbericht Teil IIb, 2021) verfolgt aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Daten einen eigenen methodischen Ansatz und leitet entwässerte Flächen primär anhand des Reliefs, der landwirtschaftlichen Landnutzung, der Bodenkarte BK50, und der Flurabstände her. Dadurch wird festgestellt, ob eine Fläche zwangsläufig entwässert sein muss, um die Befahrbarkeit und den Anbau zu ermöglichen. Das Resultat sind die in Abbildung 4-14 dargestellten potenziell dränierten Flächen mit den Drainageentwässerungsraten aus Abbildung 2-3. Diese Flächen können grundsätzlich in MIKE SHE integriert werden. Das MIKE SHE-Modell arbeitet jedoch mit

einer höheren Detailgenauigkeit und erfordert die präzise räumliche Verteilung der Verlegetiefe des Sammler- und Saugernetzwerks.

An vielen Stellen der Region, an denen im mGROWA potenzielle Drainagen ausgewiesen sind, besteht bereits ein umfangreiches Grabennetzwerk. Daher ist es schwierig, eindeutige Aussagen darüber zu treffen, ob hier ausschließlich über Gräben oder zusätzlich auch durch Sammler- und Saugerleitungen entwässert wird. In den zahlreichen Grundwasserganglinien sind keine Anzeichen erkennbar, die auf das Vorhandensein von Drainagen hinweisen. Daher wurde von zusätzlichen Drainagen abgesehen. Stattdessen wurde das Grabennetzwerk in den Fokusbereichen hochaufgelöst in das Gewässermodell integriert und die Austauschraten kalibriert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, ob sich Auswirkungen durch fehlende Drainagen zeigen.

In den Bereichen außerhalb des Fokusgebiets wurden die Flächen von mGROWA genutzt (siehe Abbildung 4-14). Es wurde die Annahme getroffen, dass innerhalb dieser Flächen in geringen Abständen Drainagen 1,5 Meter unter der Geländeoberkante installiert und intakt sind. Dieser vereinfachte Ansatz ist in den Bereichen außerhalb des Fokusgebiets ausreichend, um signifikante Effekte auf den Wasserhaushalt zu berücksichtigen und gleichzeitig die Rechenzeit des Modells zu optimieren.

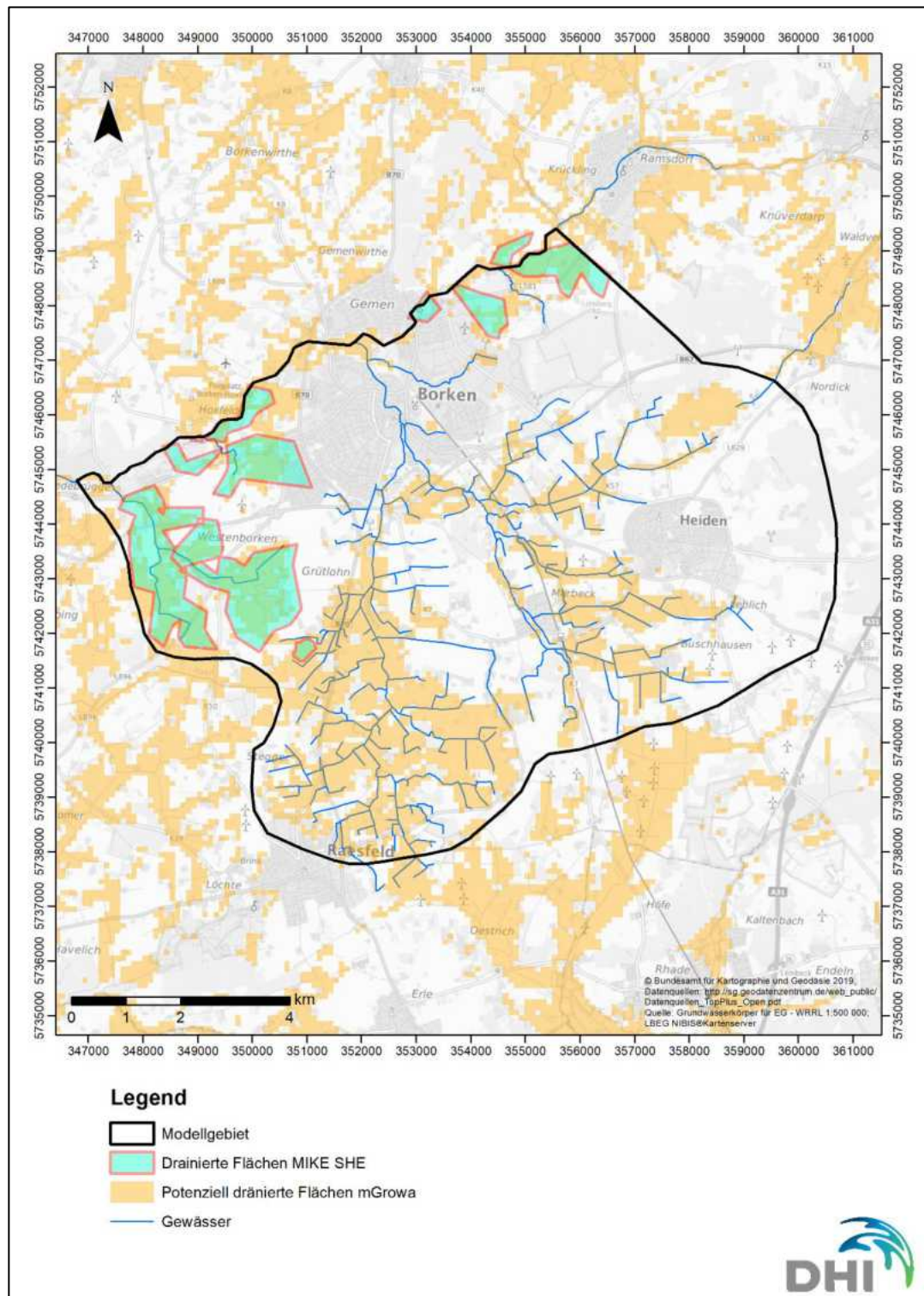


Abbildung 4-14: Drainierte Flächen des MIKE SHE Modells mit Vergleich der potenziell drainierten Flächen des mGrowa Modells.

5 Kalibrierung

Der Zeitraum für die Kalibrierung wurde in Abstimmung mit dem AG auf den 01.01.2011 bis 31.12.2022 festgelegt. Damit wurde ein ausreichend langer Zeitraum gewählt, der sowohl Trockenjahre wie 2018 und 2019 als auch den Klimawandeltrend des vergangenen Jahrzehnts berücksichtigt.

Es wurden 37 Grundwassermessstellen für die Kalibrierung berücksichtigt (Abbildung 5-1). Die Auswahl wurde primär anhand der Datenqualität getroffen. Weitere Auswahlkriterien sind:

- Geographische Position innerhalb des Modellgebiets, versucht wurde eine lokal-repräsentative Verteilung über das Gesamtmodellgebiet zu erzielen;
- Abstand zu benachbarten Grundwassermessstellen und Grundwassergradient
- Ausgewogene Verteilung und Proximität zu Fließgewässer
- Ausgewogene Verteilung und Proximität zu Brunnen

Diese Auswahl ermöglicht eine systematische Kalibrierung der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten, der Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Gewässer sowie den Einflussradius von Brunnenentnahmen.

Als Kalibrierungsgrößen wurden folgende Parameter verwendet:

- Durchfluss der Gewässerpegel
- Wasserstand der Grundwassermessstellen

Ziel der Kalibrierung ist es die Messdaten dieser Parameter so gut wie möglich zu treffen.

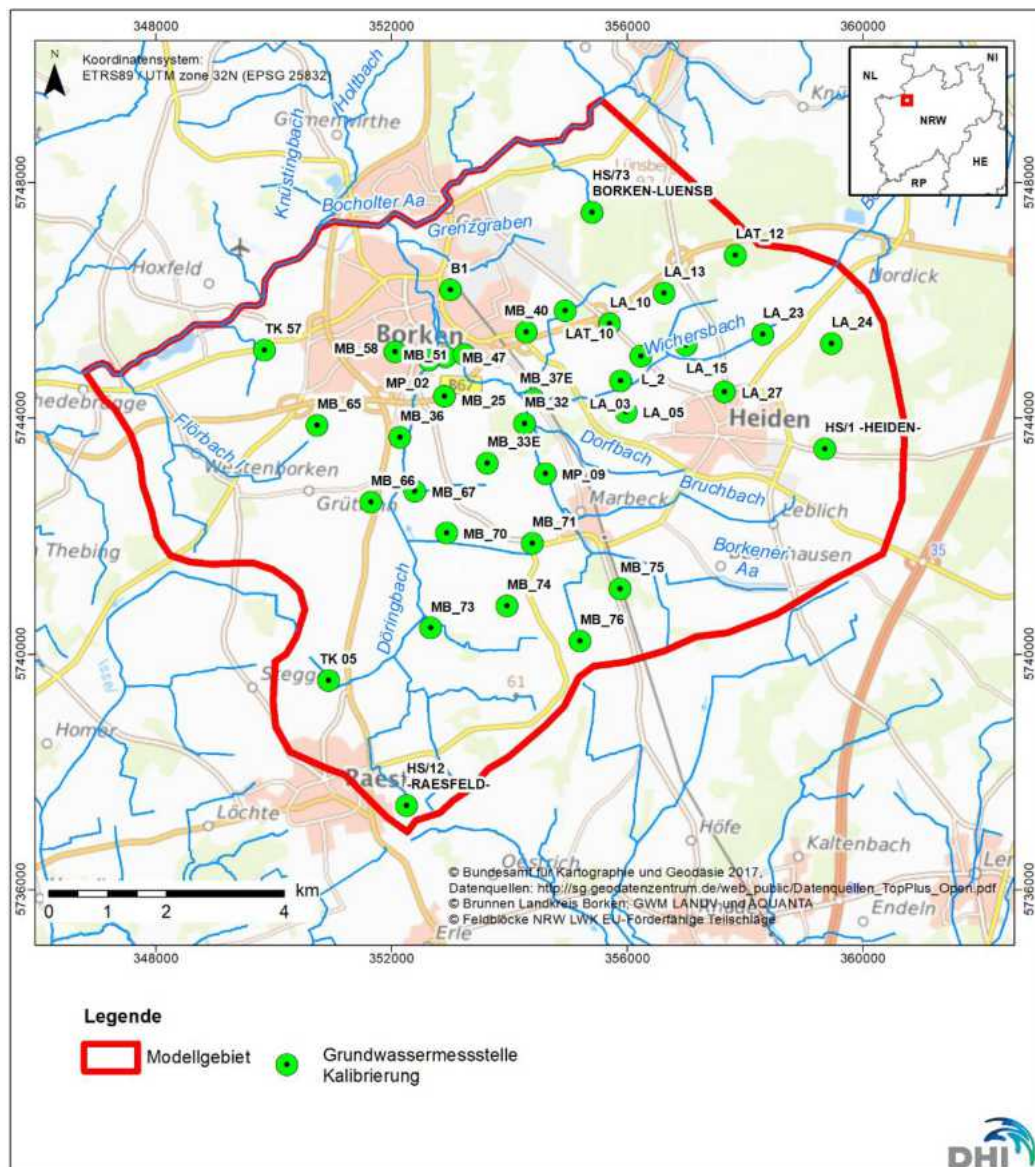


Abbildung 5-1: Darstellung der für die Kalibrierung verwendeten Grundwassermessstellen.

5.1 Stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells (MIKE SHE)

Die stationäre Kalibrierung erfolgte als Vorabkalibrierung für die instationäre Kalibrierung, da das Hauptaugenmerk der hier vorliegenden Fragestellung auf den instationären Verhältnissen lag. Das Ziel der Gesamtkalibrierung war somit, die möglichst gute Abbildung der instationären Verhältnisse.

Während der stationären Modellkalibrierung wurden vor allem der Durchlässigkeitsbeiwert innerhalb seiner Wertebereiche kalibriert. Die kalibrierten Parameter werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Des Weiteren wird die statistische Auswertung der Kalibrierung dargestellt.

5.1.1 Ergebnis Modell Parametrisierung

Generell wird beginnt die Kalibrierung mit initialen Werten, welche auf Literaturwerten oder anderen Modellen orientiert. Diese initialen Werte werden anschließend geändert, um einen guten Fit der modellierten mit den gemessenen Werten zu erreichen.

Tabelle 5-1 zeigt die initialen sowie die kalibrierten Werte für den Durchlässigkeitsbeiwert (K_f).

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der K_f -Werte (Initiale Werte und finale Werte).

Geologische Schicht	Initialer K_f -Wert	Finaler K_f -Wert
Jüngere Hauptterrasse	2e-04	2e-04
Niederterrassen (ungegliedert)	1e-03	3e-04
Halturner Sande	6e-05	7.6e-05
		4.5e-06
		4.1e-04
		2e-05
		1e-04
Grundmoräne	1e-04	2.5e-05
Walsum-Schichten	8e-05	5e-05
Ratingen- und Lintfort-Schichten	7e-05	7e-05
Recklinghausen-Schichten	9e-05	9e-05
Emscher Mergel	1e-06	1e-06

5.1.2 Güte der stationären Kalibrierung

Entsprechend dem DVGW Arbeitsblattes W 107 [7] ist der mittlere relative Fehler ein Qualitätskriterium für die Genauigkeit eines stationären Grundwassermodells. Der mittlere relative Fehler entspricht dem Quotienten aus dem mittleren absoluten Fehler zwischen belrechneten und gemessenen Werten und der Differenz der maximalen und minimalen mittleren Grundwasserstände im Gesamtmodell. Bei einem mittleren relativen Fehler von unter 5 % ist von einer guten, unter 1 % von einer sehr guten stationären Modellanpassung gesprochen.

Der mittlere absolute Fehler für den Endzustand wurde an den im Rahmen der stationären Kalibrierung berücksichtigten Grundwassermessstellen zu 0,41 m ermittelt.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung gemessener und berechneter Grundwasserstände mit statistischer Auswertung für die stationäre Kalibrierung.

Grundwassermessstelle	Modell	Messwert	Fehler	Absoluter Fehler
MB_74	58.86	58.78	0.08	0.08
TK_05	53.78	53.81	-0.03	0.03
MB_73	51.89	51.90	-0.01	0.01
MB_70	50.34	49.88	0.46	0.46
MB_76	63.86	63.61	0.25	0.25
MB_75	58.34	58.04	0.31	0.31
MB_71	53.74	53.46	0.28	0.28
MP_09	51.62	51.15	0.47	0.47
MB_32	50.03	50.36	-0.32	0.32
MB_33E	50.35	50.05	0.29	0.29
MB_37E	49.55	49.57	-0.01	0.01
HS1_Heiden_LGD_HS1	66.04	65.90	0.14	0.14
LA_24	66.00	65.79	0.21	0.21

Grundwassermessstelle	Modell	Messwert	Fehler	Absoluter Fehler
LA_23	65.53	64.95	0.57	0.57
LAT_12	63.97	64.29	-0.32	0.32
LA_27	62.74	63.40	-0.65	0.65
LA_15	60.12	60.58	-0.46	0.46
LA_13	60.43	60.13	0.30	0.30
L_2	56.92	56.68	0.24	0.24
LA_05	55.73	55.83	-0.10	0.10
LA_10	56.50	55.66	0.84	0.84
LA_03	55.47	54.25	1.22	1.22
LAT_10	54.78	54.30	0.48	0.48
MB_40	51.79	51.84	-0.04	0.04
B1	45.24	43.93	1.31	1.31
MB_65	48.95	49.87	-0.91	0.91
TK_57	40.82	40.76	0.06	0.06
MB_66	48.14	48.33	-0.19	0.19
MB_67	48.17	48.05	0.12	0.12
MB_36	46.97	46.72	0.26	0.26
MB_25	46.65	45.55	1.10	1.10
MB_58	46.40	45.29	1.11	1.11
MB_51	45.25	45.26	-0.01	0.01
MB_47	45.18	44.58	0.59	0.59
MP_02	45.26	44.54	0.72	0.72
	Niedrigster Messwert	40.76	Niedrigster Fehler	0.01
	Höchster Messwert	65.90	Größter Fehler	1.31
	GW-Gefälle	25.14	Mittlerer Fehler	0.24
			Mittlerer absoluter Fehler (MAE)	0.41
			Relativer Fehler	2%

Im ermittelten Endzustand der stationären Kalibrierung beträgt der mittlere relative Fehler 2 %, die vorliegende stationäre Kalibrierung wird gemäß dieser Bewertung als gut eingestuft.

5.2 Instationäre Kalibrierung des Grundwassermodells (MIKE SHE)

Mit einer instationären Kalibrierung kann die Wiedergabetreue der Simulation weiter verbessert werden, da mit den zusätzlichen Informationen Parameterstrukturen und Prozesse identifiziert werden können, die im Rahmen der stationären Kalibrierung nicht erkennbar sind (DVGW, 2016).

Bei der instationären Kalibrierung wurden zeitabhängige gemessene mit berechneten Ganglinien der Grundwassermessstellen verglichen. Ebenfalls werden Gewässerdurchflüsse verglichen. Die Qualität einer instationären Kalibrierung zeichnet sich durch die Erfassung der natürlichen Dynamik und insbesondere der Unterschiede in der Dynamik aus (DVGW, 2016).

Bei der instationären Kalibrierung wurden folgende Parameter angepasst:

- Hydraulische Leitfähigkeit

- Transferrate des Gewässerbetts
- Porosität
- Speicherkoeffizient

5.2.1 Ergebnis Modell Parametrisierung

Die bei der instationären Kalibrierung ermittelten Parameter sind zusammen mit den initial angesetzten Werten in Tabelle 5-3 aufgeführt.

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der K_r -Werte (Initiale Werte und finale Werte)

Geologische Schicht	Initialer K_r -Wert	Finaler K_r -Wert
Jüngere Hauptterrasse	2.00E-04	1.00E-04
Niederterrassen (ungegliedert)	3.00E-04	1.00E-04
Halterner Sande	7.60E-05	6.50E-05
Halterner Sande - 1	4.50E-06	3.00E-06
Halterner Sande - 2	4.10E-04	2.05E-04
Halterner Sande – 3	2.00E-05	3.00E-05
Halterner Sande - 5	1.00E-04	5.00E-05
Grundmoräne	2.50E-05	5.00E-05
Walsum-Schichten	5.00E-05	2.50E-05
Ratingen- und Lintfort-Schichten	7.00E-05	3.50E-05
Recklinghausen-Schichten	9.00E-05	4.50E-05
Emscher Mergel	1.00E-06	1.00E-06

Des Weiteren wurden folgende Parameter im Modell im Laufe der Kalibrierung angepasst:

Der weit verbreitete unterhalb des Oberbodens gelegene mittlere Feinsand (Ld3) wurde von einer Porosität von 38% auf 25% verringert. Dadurch konnten die Perkulationsprozesse und somit Dynamiken des Grundwassers verbessert werden.

Der Grundwasserspiegel und die in die Gewässerläufe exfiltrierende Wassermenge stehen in Wechselwirkung zueinander. Ist der Grundwasserspiegel in der Nähe eines bestimmten Grabens zu hoch, kann dies darauf hindeuten, dass die Durchlässigkeit des betreffenden Grabens zu niedrig angesetzt wurde und somit das überschüssige Wasser zu langsam abgeleitet wird.

Die Parametrisierung der hydraulischen Anbindung an die Gewässer (Leckage-Koeffizienten) ist ein iterativer Prozess, bei dem sowohl die Abflussdaten der Wasserläufe als auch die Pegel der Grundwassermessstellen berücksichtigt werden müssen.

Als Ausgangswert wurde der Leckage-Koeffizient der Gräben auf $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ gesetzt. Anschließend wurden lokal Anpassungen vorgenommen, basierend auf den Abweichungen der Simulationsergebnisse. Schließlich erhielten die kleineren Entwässerungsgräben überwiegend einen Wert von $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, während für die größeren Wasserläufe $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ angesetzt wurde. Die Durchlässigkeit der Borkener Aa wurde auf $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ kalibriert.

Tabelle 5-4: Statistische Auswertung der instationären Kalibrierung.

Grundwasser- messstelle	Fehler	Absoluter Fehler	RMSE	Korrelation
MB_74	0,46	0,47	0,56	0,52
TK_05	0,20	0,24	0,29	0,90
MB_73	0,48	0,59	0,80	0,67
MB_70	-0,37	0,38	0,40	0,88
MB_76	-0,38	0,58	0,75	0,55
MB_75	-0,58	0,59	0,61	0,89
MB_71	-0,34	0,43	0,64	0,53
MP_09	-0,26	0,26	0,27	0,69
MB_32	0,63	0,63	0,65	0,89
MB_33E	0,03	0,23	0,28	0,67
MB_37E	0,36	0,36	0,37	0,86
HS1_Heiden_HS1	-1,51	1,51	1,57	0,87
LA_24	-1,27	1,28	1,35	0,59
LA_23	-0,56	0,60	0,69	0,72
LAT_12	-0,19	0,41	0,51	0,44
LA_27	0,32	0,43	0,51	0,79
LA_15	-0,25	0,36	0,45	0,70
LA_13	-0,68	0,70	0,79	0,64
L_2	0,29	0,37	0,44	0,81
LA_05	0,04	0,21	0,28	0,85
LA_10	-0,01	0,29	0,34	0,72
LA_03	-0,57	0,57	0,58	0,77
LAT_10	-0,11	0,25	0,37	0,65
MB_40	-0,54	1,60	1,92	-0,09
B1	-1,24	1,25	1,26	0,54
MB_65	1,46	1,47	1,49	0,77
TK_57	0,93	0,93	1,11	0,22
MB_66	-0,03	0,14	0,32	0,69
MB_67	0,08	0,12	0,19	0,75
MB_36	0,27	0,27	0,28	0,90
MB_25	0,64	0,64	0,69	0,68
MB_58	-0,35	0,38	0,43	0,62
MB_51	0,55	0,55	0,56	0,82
MB_47	0,28	0,29	0,33	0,73
MP_02	0,46	0,46	0,51	0,36
	Niedrigster Messwert	39.51	Mittlerer Fehler	-0.05
	Höchster Messwert	67.72	Mittlerer absoluter Fehler (MAE)	0.57
	GW-Gefälle	28.21	Mittlere Korrelation	67%
			Mittlerer RMSE	0,65
			Gütekriterium	2%

Da in Deutschland keine Richtlinie zur Bewertung von instationärer Kalibrierung besteht, findet die australische Richtlinie zur Grundwassermodellierung Anwendung (Merz et. al., 2012). Dabei wird der mittlere RMSE (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) durch das Grundwassergefälle geteilt. Das Ergebnis der Güte von 2 % ist als überdurchschnittlich gut zu bewerten.

5.2.2 Kalibrierte Grundwasserganglinien

Im Folgenden werden einige Grundwassermessstellen vorgestellt, die zur Darstellung der Kalibrierungsergebnisse für verschiedene Bereiche des Modellgebiets herangezogen wurden. Ziel der Kalibrierung war es, die simulierten Ergebnisse möglichst genau an die gemessenen Werte anzupassen. Wie das Ergebnis aus Tabelle 5-4 zeigt, wurde diese Ziel erfüllt. Der Fokus wurde vor allem auf das Fokusgebiet der Wasserschutzgebiete gesetzt. Lokal zeigen sich kleinere Abweichungen sowohl in der Dynamik als auch in den Grundwasserspiegeln. Auf die einzelnen Teilgebiete und Grundwassermessstellen wird im Folgenden eingegangen (vgl. Abbildung 5-2).

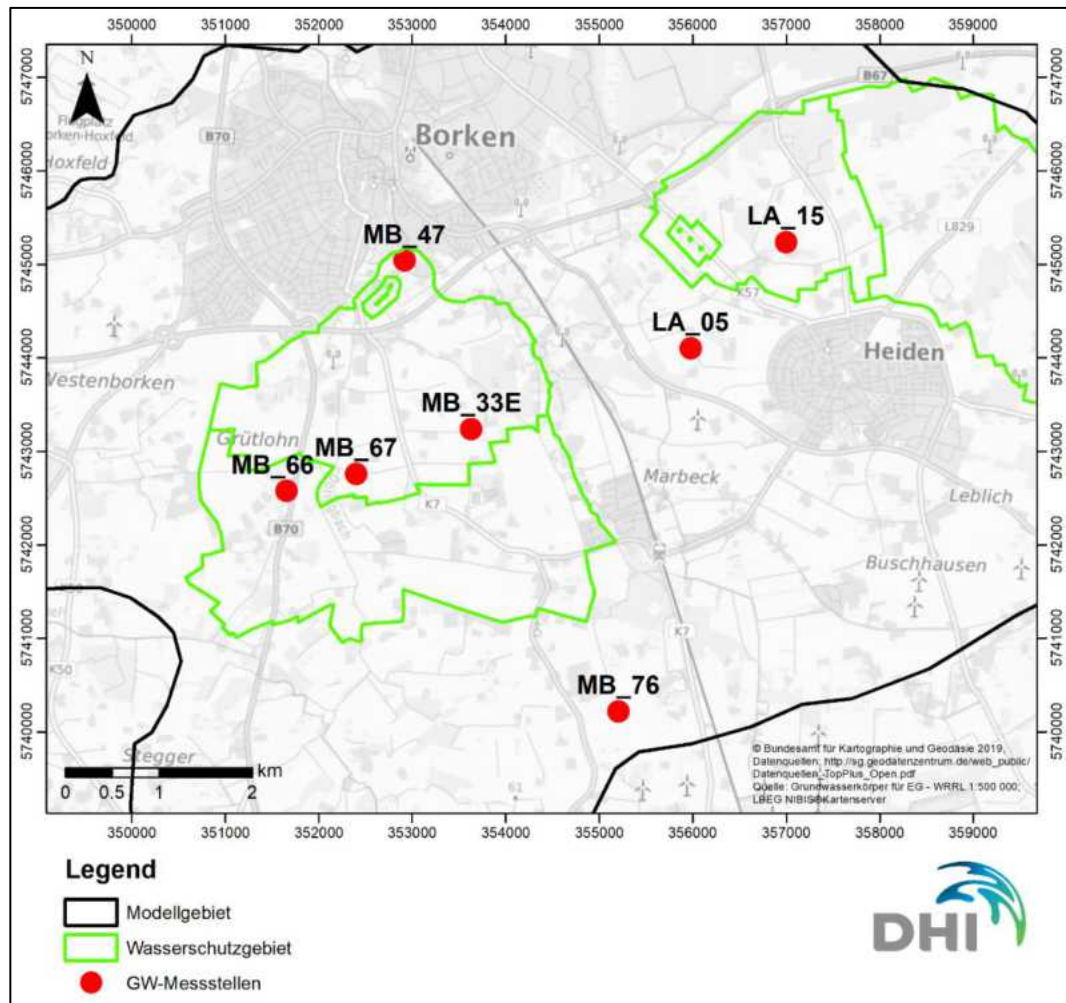


Abbildung 5-2: Standorte der Grundwassermessstellen für die Auswertung der instationären Kalibrierung.

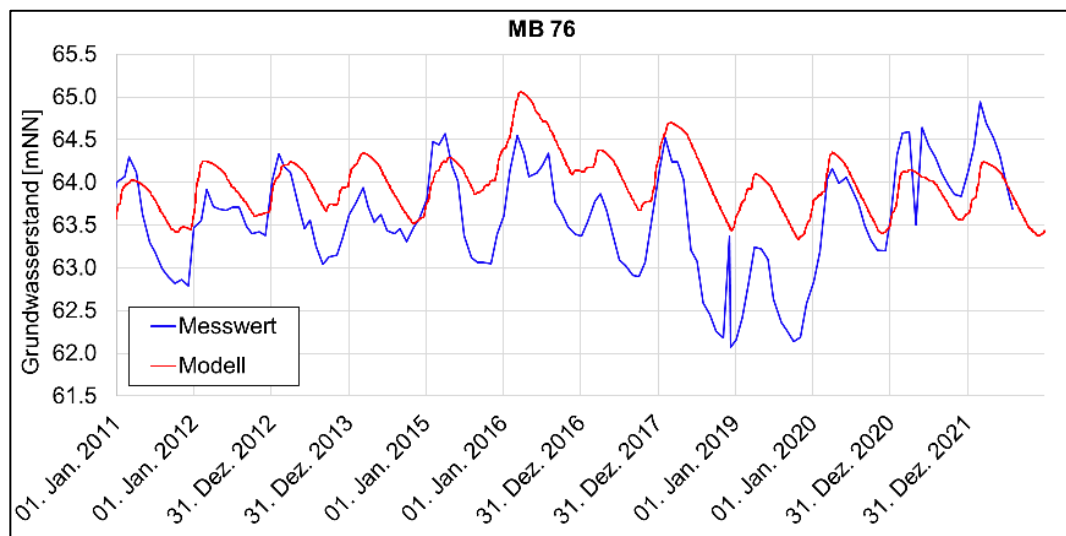


Abbildung 5-3: Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 76.

Die Grundwassermessstelle MB 76 befindet sich im südlichen Bereich des Modellgebiets. Die gemessenen Grundwasserstände schwanken innerhalb eines Bereichs von ca. 3 m (zwischen 62 m und 65 m ü. NN). Die simulierten Werte zeigen eine geringere Schwankungsbreite zwischen 63,4 m und 65 m ü. NN. Daraus ergibt sich, dass die gemessenen Grundwasserspiegel dynamischer verlaufen als die simulierten. Zudem reagiert das Modell in diesem Bereich etwas verzögert auf Veränderungen. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass die Maximalwerte in feuchten Perioden sowie die Minimalwerte in trockenen Sommermonaten später auftreten als in den Messwerten.

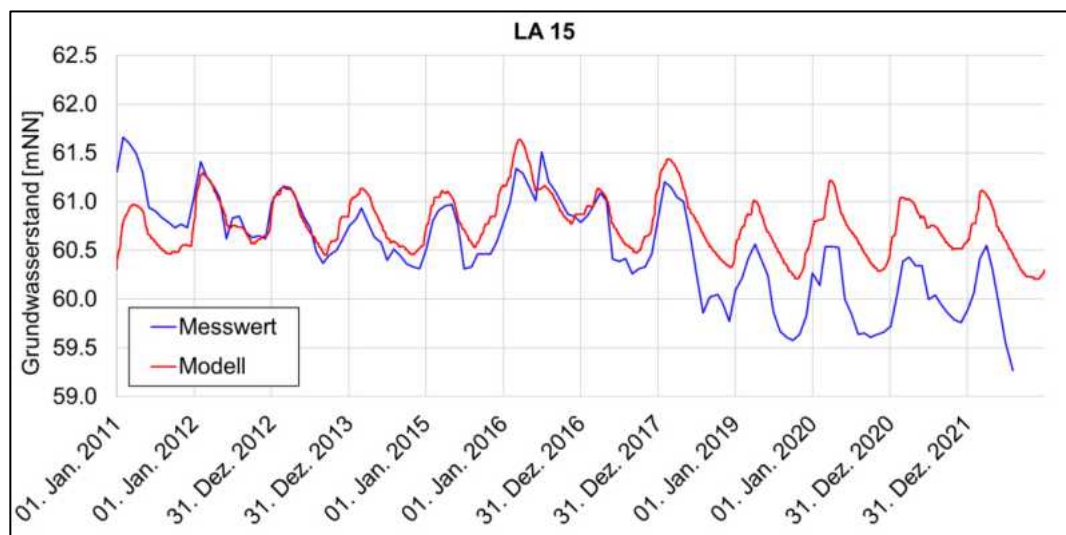


Abbildung 5-4: Kalibrierungsergebnis der Messstelle LA 15.

Die Messstelle LA 15 liegt im östlichen Bereich des Modellgebiets. Der gemessene minimale Grundwasserspiegel sank unter 59,5 m ü. NN, während das Maximum über 61,5 m ü. NN lag. Die simulierten Werte bewegen sich in einem engeren Bereich, mit einem Minimum von 60,25 m und einem Maximum, das nahezu mit dem gemessenen Höchstwert übereinstimmt. Die Dynamik der Simulation entspricht weitgehend der Realität, insbesondere in Zeiträumen mit geringen Schwankungen, wie in der ersten Jahreshälfte 2013 und 2017. Insgesamt zeigt sich, dass der simulierte Trend des Grundwasserspiegels ebenfalls rückläufig ist, jedoch in geringerem Maße als in den

Messwerten. Hierbei ist zu beachten, dass sich in der Nähe der Messstelle eine Grundwasserentnahme befindet.

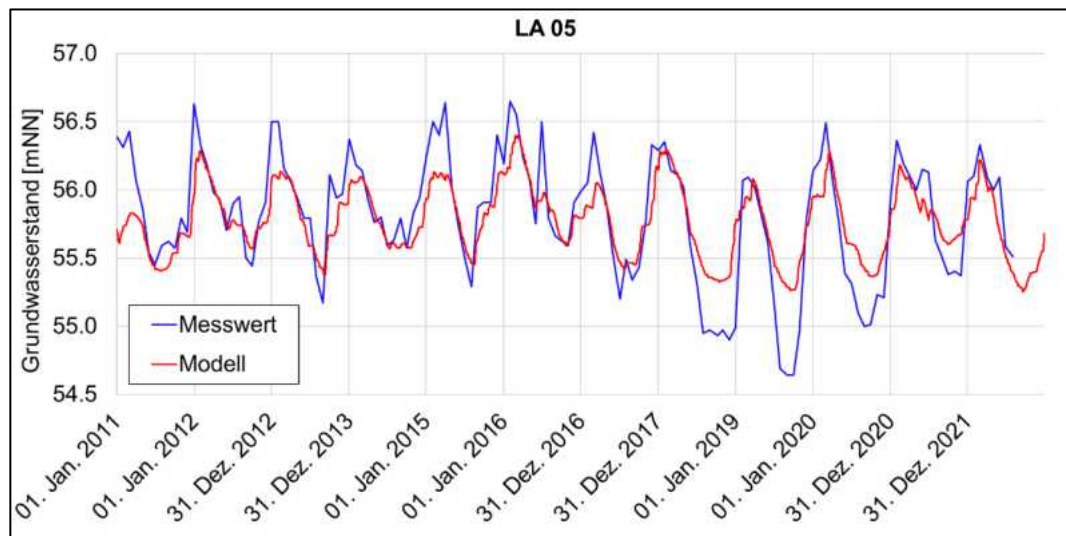


Abbildung 5-5: Kalibrierungsergebnis der Messstelle LA 05.

Die Messstelle LA 05 liegt südwestlich von LA 15, in Richtung der Modellgebietsmitte und nahe des Wasserlaufs Wichersbach. Der gemessene Grundwasserspiegel schwankte zwischen einem Minimum von etwa 54,7 m und einem Maximum von über 56,5 m ü. NN. Die simulierten Werte liegen in einem engeren Bereich zwischen 55,3 m und 56,4 m ü. NN. Die Dynamik der Simulation folgt jedoch weitgehend den realen Schwankungen. Besonders in den trockenen Perioden zu Sommerbeginn zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

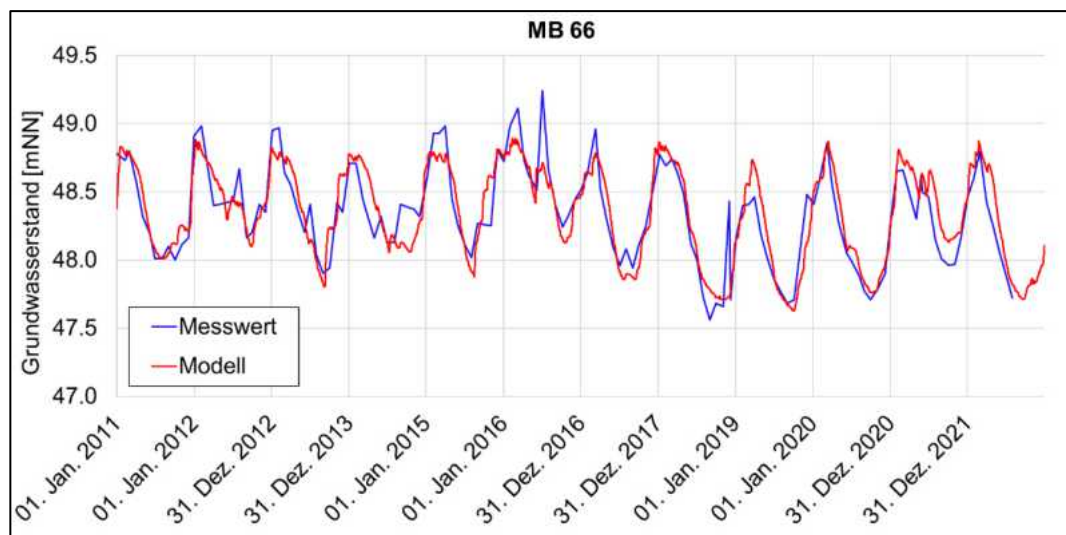


Abbildung 5-6: Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 66.

Die Messstelle MB 66 befindet sich im westlichen Teil des Fokusgebiets. Die simulierten Werte liegen im Durchschnitt 3 cm über den gemessenen Grundwasserspiegeln. Die Dynamik der Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, wobei extreme Höchst- und Tiefstwerte ebenfalls gut nachgebildet werden. Da sich diese Messstelle nahe dem Zentrum des untersuchten Gebiets befindet, ist die hohe Übereinstimmung besonders vorteilhaft.

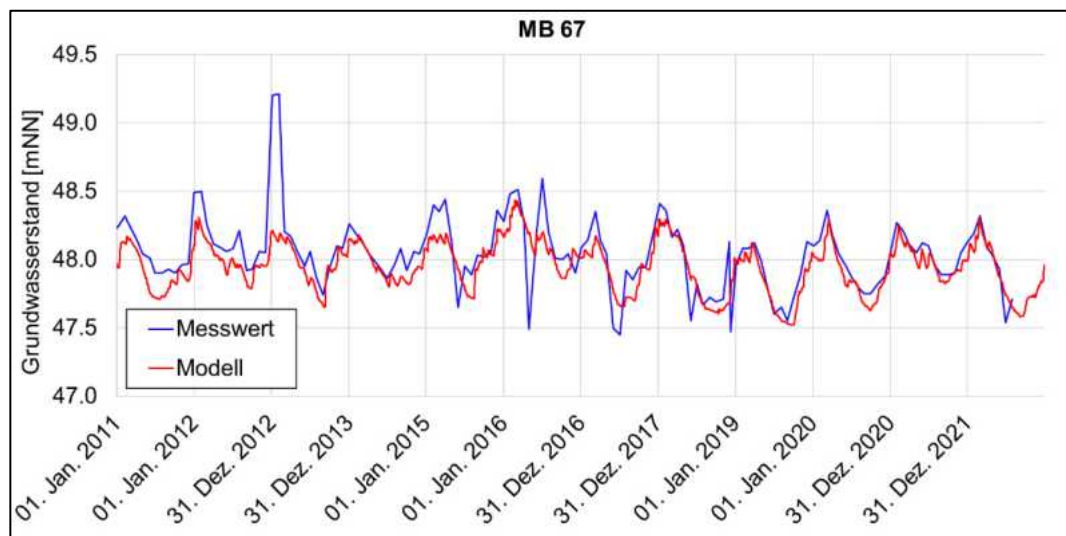


Abbildung 5-7: Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 67.

Die Messstelle MB 67 liegt etwas östlich von MB 66, in einer Region mit Grundwasserentnahme. Die Dynamik des simulierten Grundwasserspiegels zeigt eine ähnlich gute Übereinstimmung wie bei MB 66, jedoch treten in den Messwerten stärkere Schwankungen auf. Insbesondere zu Beginn des Jahres 2013 wurden ungewöhnlich hohe Spitzenwerte gemessen, die höchstwahrscheinlich auf Messfehler zurückzuführen sind.

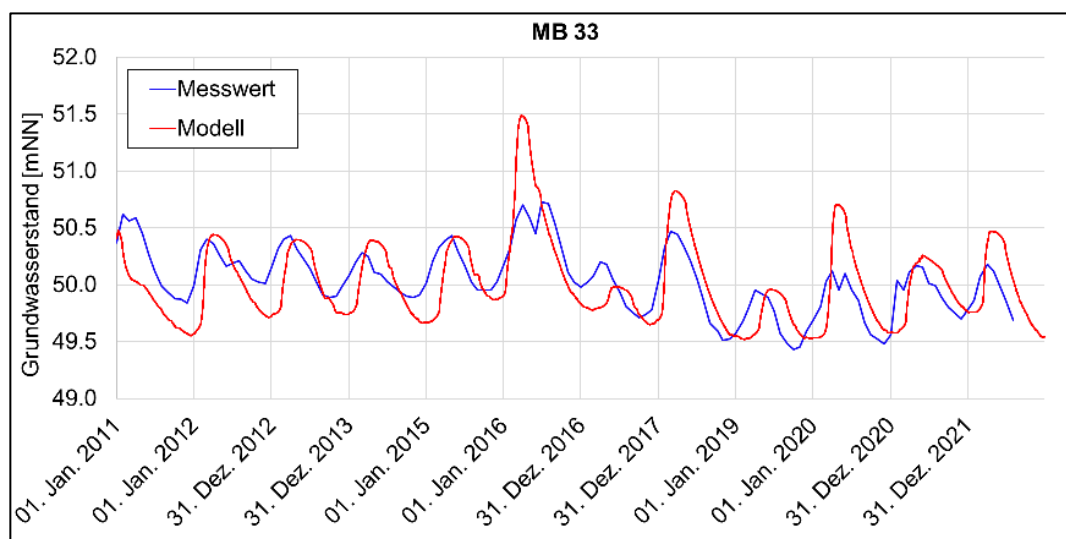


Abbildung 5-8: Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 33E.

Die Messstelle MB 33E liegt im östlichen Teil des Fokusgebiets. Die simulierten Grundwasserspiegel liegen im Durchschnitt 3 cm unter den gemessenen Werten. Die Simulation zeigt eine stärkere Dynamik als die Messwerte, wobei sich einzelne Maximal- und Minimalwerte zeitlich verzögert einstellen. Obwohl die Abweichungen hier größer sind als bei den zuvor vorgestellten Messstellen, folgt die Simulation dennoch den langfristigen Trends trockener und feuchter Jahre.

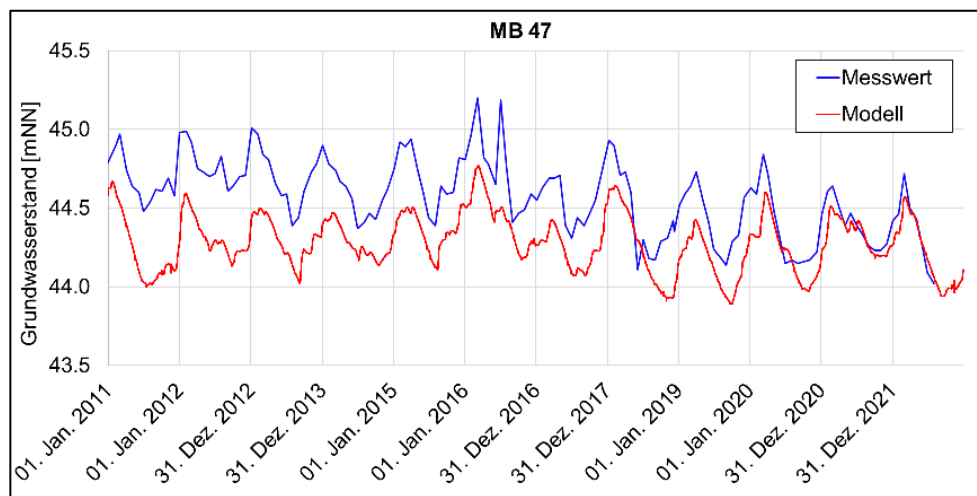


Abbildung 5-9: Kalibrierungsergebnis der Messstelle MB 47.

Die Messstelle MB 47 befindet sich im nördlichen Bereich des Fokusgebiets, in der Nähe des Wasserlaufs Borkener Aa und einer Grundwasserentnahmestelle. Die Dynamik der simulierten Grundwasserbewegung entspricht weitgehend den Messwerten. Während die jährlichen Maximal- und Minimalwerte gut nachgebildet werden, zeigt sich im frühen Simulationszeitraum eine größere Abweichung, da die simulierten Werte unter den gemessenen liegen. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums verringert sich diese Differenz jedoch deutlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Kalibrierung erfolgreich war und die simulierten Ergebnisse die gemessenen Werte gut widerspiegeln. Es wurde ein NRMSE-Wert von 2 % erreicht, welcher als sehr gutes Ergebnis zu bewerten ist. Auf dieser Grundlage kann das kalibrierte Modell als geeignet für Szenarioanalysen betrachtet werden.

5.2.3 Kalibrierte Gewässerpegel

Die Kalibrierung des Modells betraf nicht nur die geologischen Eigenschaften, sondern auch die Durchlässigkeit der Flussbetten. Die Kalibrierung erfolgte anhand der Abflussmessungen der Pegelstation Borken-Stadt (Abbildung 5-10), die den Abfluss der Borkener Aa erfasst, sowie die Pegelwasserstände der WLV-Pegel (diese wurden vor allem für die Verifizierung verwendet). Insgesamt konnte die Dynamik und der Abfluss gut mit dem Modell nachgebildet werden.

Es verbleibt eine gewisse Abweichung vom Abfluss von im Durchschnitt $0,0337 \text{ m}^3/\text{s}$ im Vergleich zu den gemessenen Werten. Diese sind vor allem durch Abflussspitzen von einzelnen kurzweiligen Regenereignissen zu erklären.

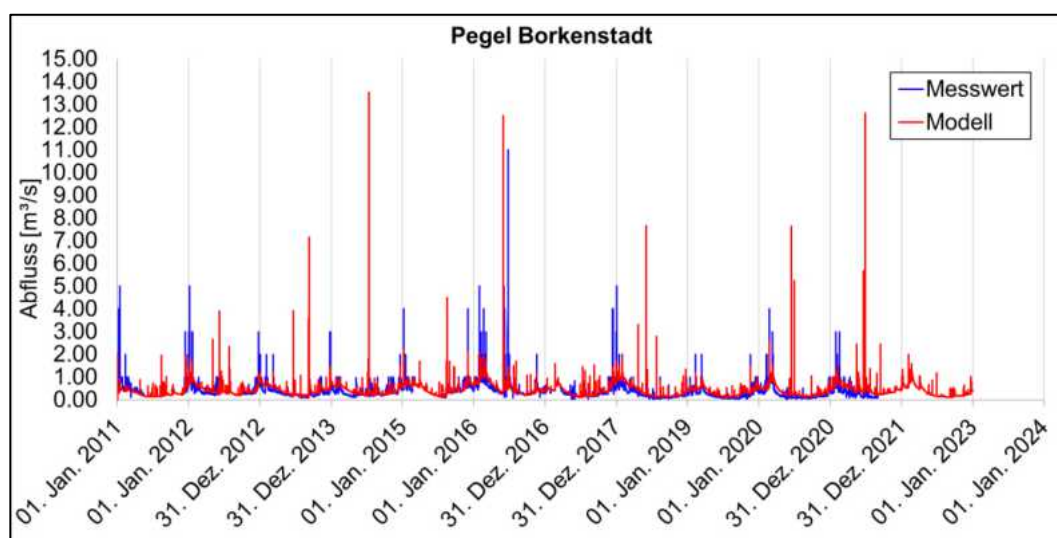


Abbildung 5-10: Kalibrierungsergebnis des Gewässerabflusspegels Borken-Stadt.

6 Ergebnisse IST-Zustand

Das Modell wurde erfolgreich kalibriert (vgl. Kapitel 5.1 & 5.2) und steht nun für belastbare Analysen des Untersuchungsgebiets zur Verfügung. Bevor es für die Simulation verschiedener Szenarien zur Wasserrückhaltung eingesetzt wird, werden die Ergebnisse der Kalibrierung detailliert betrachtet. Diese dienen später als Referenzlauf, um die Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen mit dem aktuellen Zustand zu vergleichen.

6.1 Grundwasser

Zur besseren Einordnung wird das Modellergebnis mit dem bestehenden Grundwassergleichenplan von 1988 verglichen. Abbildung 6-1 zeigt den über die gesamte MIKE SHE-Simulationsperiode (2011–2022) gemittelten Grundwassergleichenplan. Der Vergleich mit dem Plan von 1988 (siehe Abbildung 2-8) liefert folgende Erkenntnisse.

Im Süden zeigt das Modell eine deutliche entwässernde Wirkung durch das umfangreiche Grabennetzwerk. Im Plan von 1988 ist diese Anbindung an die größeren Gewässerstränge ebenfalls zu erkennen, allerdings scheint es, als wären kleinere Gräben entweder nicht berücksichtigt worden, oder existierten zu dem Zeitpunkt noch nicht.

Im nordwestlichen Bereich sind die Pläne weitgehend übereinstimmend. Im Osten hingegen weist der Wichersbach zwischen Heiden und Borken im Plan von 1988 eine starke entwässernde Wirkung auf. Das Modellergebnis mit MIKE SHE zeigt ebenfalls eine Anbindung, jedoch weniger ausgeprägt und erst weiter flussabwärts. Ein ähnliches Muster ist am Bruchbach zu beobachten. Diese Unterschiede könnten unter anderem auf landwirtschaftliche Bewässerungsbrunnen zurückzuführen sein, die in MIKE SHE berücksichtigt wurden. Da eine solche Einbindung nicht allgemeiner Standard ist, kann angenommen werden, dass diese Entnahmen 1988 entweder nicht berücksichtigt wurden oder noch nicht genehmigt waren.

Im Süden, insbesondere an den südlichen Seitenarmen der Borkener Aa, zeigt der Plan von 1988 keine erkennbare Anbindung. Im Modell von MIKE SHE hingegen ist eine schwache Entwässerungswirkung nachweisbar.



Grundwassergleichenplan gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum.

Des Weiteren wurde eine gemittelte Flurabstandskarte erstellt, um lokale Verhältnisse besser darzustellen (siehe Abbildung 5-2). Die Karte zeigt, dass vor allem im Osten des Modellgebiets ein hoher Flurabstand zu verzeichnen ist, weshalb die Seitenarme des Wichersbachs primär durch Oberflächenabfluss gespeist werden und somit keine Anbindung im Gleichenplan zu erkennen ist. Auch im Zentrum des Gebietes, nahe des Fellerhofgrabens sind hohe Flurabstände bis über sechs Meter zu verzeichnen. Dies ist ebenfalls im Gleichenplan zu sehen, da sowohl der Fellerhofgraben als auch die zwei

Seitenarme nördlich, keine Anbindung ans Grundwasser aufweisen. Im Süden des Modellgebiets sind niedrige Flurabstände zu erkennen. Die zahlreichen Gräben in diesem Bereich entwässern das Einzugsgebiet des Döringbach stark.

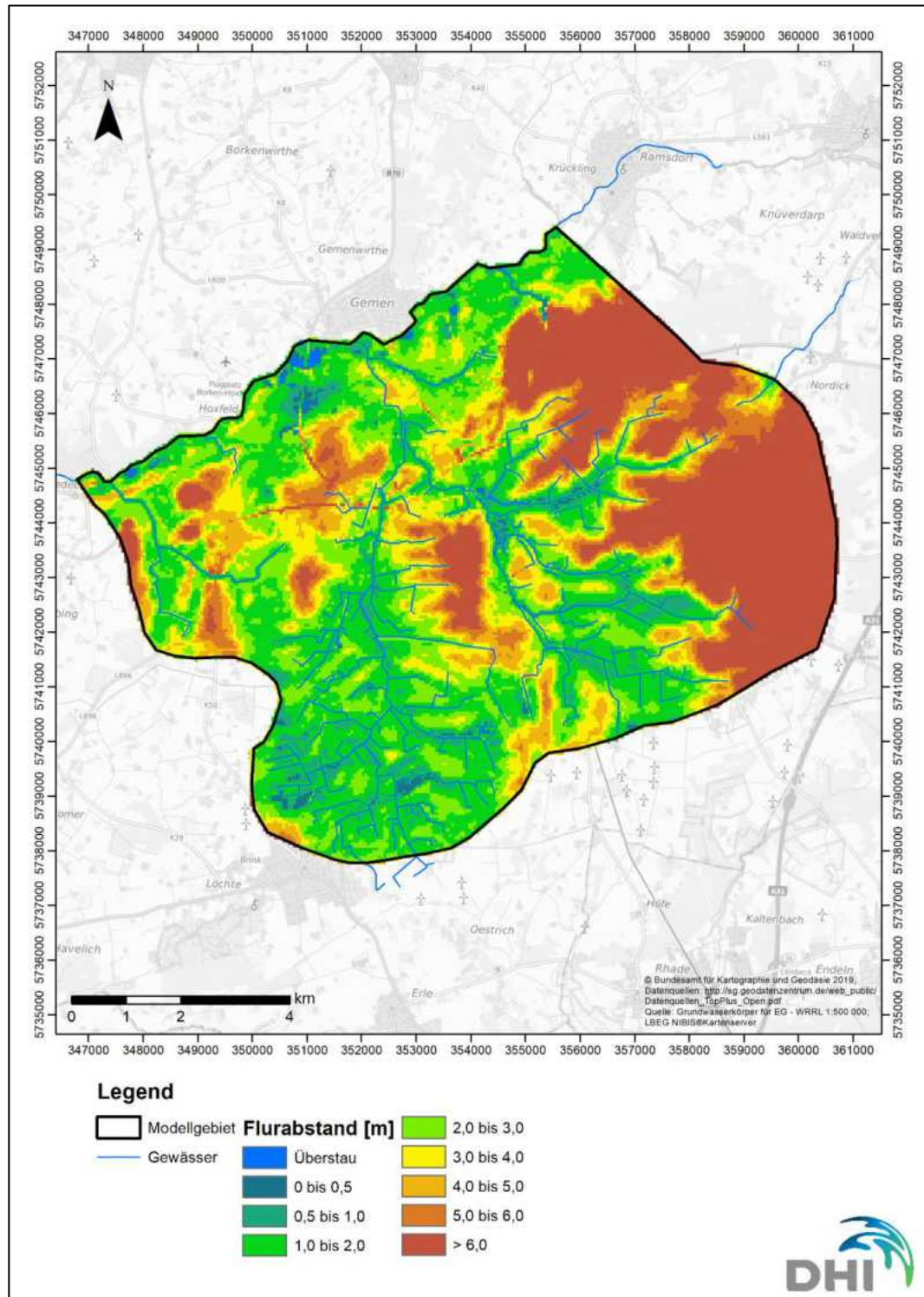


Abbildung 6-2: Flurabstandskarte gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum.

Ein weiterer bedeutender Vergleich zur Einordnung des Modells in verschiedene wasserwirtschaftliche Diskussionen ist die Gegenüberstellung der Grundwasserneubildung nach MIKE SHE und mGROWA. Das mGROWA-Modell

(mehrschichtiges großräumiges Wasserhaushaltsmodell) wurde vom Forschungszentrum Jülich entwickelt, um den Wasserhaushalt großräumig und detailliert zu simulieren. Es berechnet standortbezogen in täglicher Auflösung die tatsächliche Verdunstung und den Gesamtabfluss auf Basis von Niederschlagsmengen und klimatischen Einflussgrößen. Dabei berücksichtigt es die Wasserspeicherung und Sickerbewegung durch ein Bodenschichten-Ansatz sowie den möglichen kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser. Die Auflösung der Berechnungszellen liegt bei 100 Metern. Die berechneten Tageswerte werden anschließend zu Monats-, Jahres- oder längeren Mittelwerten aggregiert. Der Gesamtabfluss wird basierend auf Standorteigenschaften in verschiedene Abflusskomponenten wie urbanen Direktabfluss, Sickerwasserrate, Zwischenabfluss, Drainageabfluss, Grundwasserneubildung und Direktabfluss aufgeteilt. (Geobericht 36, 2019)

Ein wesentlicher Unterschied zwischen MIKE SHE und mGROWA besteht darin, dass MIKE SHE das Grundwasser direkt in die Berechnungen einbezieht, anstatt es als Randbedingung zu behandeln. Durch die Kopplung mit MIKE Hydro ermöglicht MIKE SHE zudem eine dynamische Simulation der Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern. Dadurch werden Direktabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss physikalisch basiert berechnet, während mGROWA einen anderen Ansatz verfolgt. Dies ist insbesondere für dieses Modellgebiet von großer Bedeutung, da die Entwässerungsgräben sowie die hydraulische Anbindung des Grundwassers an die Oberflächengewässer einen maßgeblichen Einfluss auf die hydrologischen Prozesse ausüben. Zudem ist das hier vorgestellte MIKE SHE-Modell speziell auf lokale Gegebenheiten und Abflüsse kalibriert, wodurch die Wasserbilanz geschlossen wird. Im Gegensatz dazu erfolgten die Kalibrierung und Validierung des mGROWA-Modells auf einer größeren räumlichen Skala, wobei der Fokus auf den Abflüssen an größeren Vorflutern liegt, und lokale Effekte vernachlässigt werden.

Die Grundwasserneubildung nach MIKE SHE ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Es ergibt sich eine für den Zeitraum 2011 bis 2022 gemittelte Grundwasserneubildungsrate von 251 mm/a (siehe Abbildung 6-3). Damit liegt diese um 141 mm/a höher als mGROWA mit 110 mm/a. Dieser Unterschied resultiert aus den konzeptionellen Abweichungen zwischen mGROWA und MIKE SHE. In MIKE SHE wird die Grundwasserneubildung physikalisch modelliert: Wasser versickert, perkoliert ins Grundwasser, hebt den Grundwasserspiegel an und wird anschließend lokal über Drainagen und Gräben abgeleitet. Dadurch werden Verluste durch Drainagen und die Wechselwirkung mit Gewässern konzeptionell in der Grundwasserneubildung nicht als Verlustkomponente miteingerechnet, sondern getrennt bilanziert. Im Gegensatz dazu zieht mGROWA basierend auf einem vereinfachten Entscheidungsbaumverfahren den Drainage- und Zwischenabflussanteil unmittelbar ab, bevor das Grundwasser erreicht wird.

Damit ein quantitativer Vergleich mit mGROWA erfolgen kann, muss in MIKE SHE Gewässeraustausch und Drainageabfluss von der Grundwasserneubildung abgezogen werden. Damit kommt man in MIKE SHE auf eine Neubildung von 93 mm/a (2011-2022), welche 17 mm/a unter mGROWA liegt.

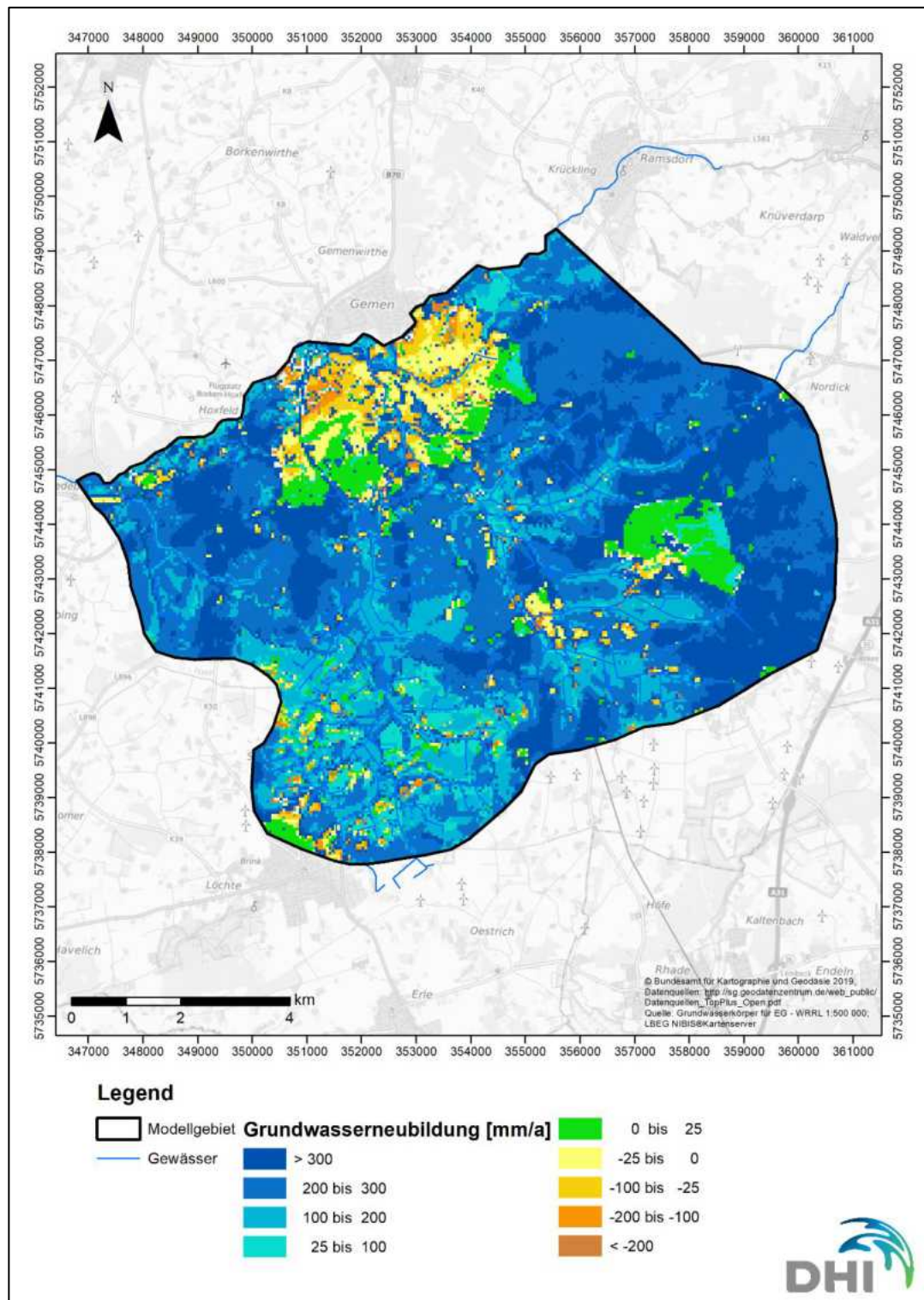


Abbildung 6-3: Grundwasserneubildung gemittelt über den gesamten Simulationszeitraum. 251 mm/a. Abzüglich des Gewässeraustausches und der Drainageabflusses beträgt die Neubildung 93 mm/a.

6.2 Wasserbilanz

Mithilfe der MIKE SHE Modellergebnisse können detaillierte Wasserbilanzen aller hydrologischen Teilprozesse erstellt werden. Diese tragen zum Verständnis der lokalen Hydrologie und Hydrogeologie bei und es können quantitative Aussagen getroffen werden.

In Abbildung 6-4 ist die Klimabilanz als Wasserwirtschaftsjahressummen des Zeitraums von 2011 bis 2022 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass es sich nicht um die klimatische Wasserbilanz handelt, sondern um die tatsächliche Bilanz, die die real auftretende, von der Wasserverfügbarkeit abhängige Verdunstung berücksichtigt, anstelle der ausschließlich klimabasierten potenziellen Evapotranspiration. Die Differenz zeigt, dass mehr Niederschlag fällt, als tatsächlich verdunstet oder transpiert. In den niederschlagsreichsten Jahren beträgt der positive Netto-Wassereintrag bis zu 353 mm/a, während er im Trockenjahr 2018 nur 157 mm/a erreicht. Dies verdeutlicht, dass dem Gebiet durch Niederschlag mehr Wasser zugeführt wird, als durch Evapotranspiration verloren geht.

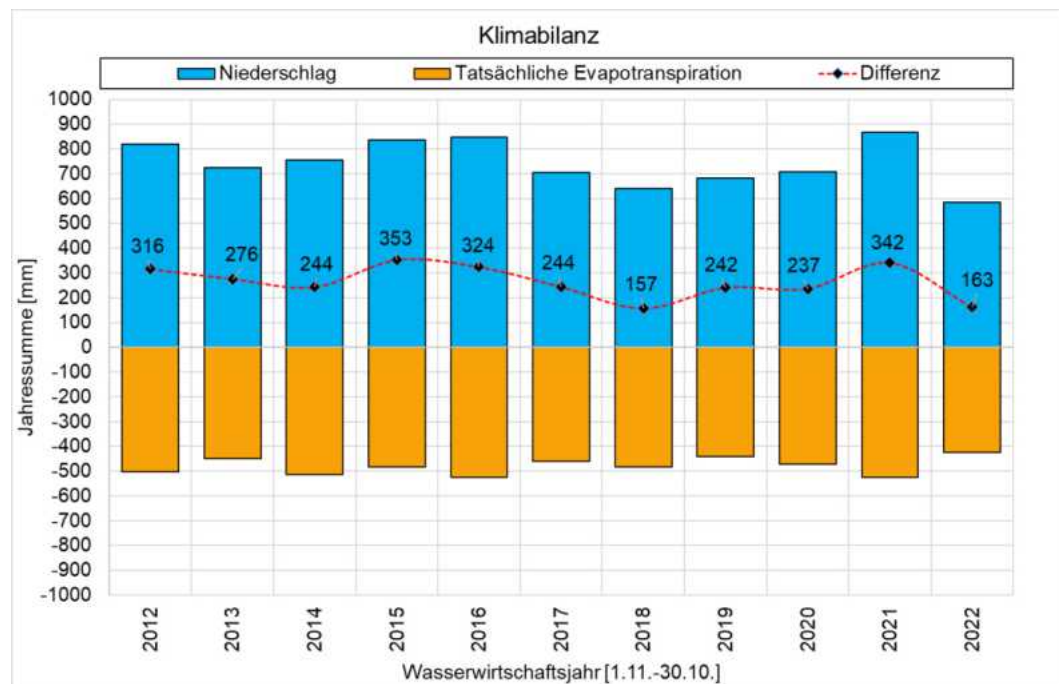


Abbildung 6-4: Klimabilanzsummen der Wasserwirtschaftsjahre 2012 bis 2022.

Im nächsten Schritt wird die vollständige Wasserbilanz betrachtet, die sämtliche Zu- und Abflüsse des Grundwasserkörpers im Einzugsgebiet einbezieht. In Abbildung 6-5 sind diese Komponenten erneut als Summen der einzelnen Wasserwirtschaftsjahre dargestellt. Betrachtet man die positive Achse, wird deutlich, dass neben dem Niederschlag nur ein geringer Anteil aus Bewässerung und Gewässerinfiltration zur positiven Bilanz beiträgt. Auf der anderen Seite allerdings kommen einige weitere Verluste zu tragen. Der Basisabfluss macht hier den entscheidenden Anteil aus. Dies lässt sich durch das dichte Grabennetzwerk erklären, welches das Grundwasser an vielen Stellen im Modellgebiet entwässert. Außerdem spielt die hohe hydraulische Durchlässigkeit der Halterner Sande hier zusätzlich eine entscheidende Rolle. Anschließend folgt der Anteil des Drainageabflusses, der aufgrund des konzeptionellen Ansatzes nur im Nordwesten des Gebiets relevant ist (vgl. Kapitel 4.9.3), sowie die Grundwasserentnahmen, die hauptsächlich für die öffentliche Wasserversorgung und landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden.

Zusätzlich ist in der Abbildung der Boden- und Grundwasserspeicher als gepunktete Linie dargestellt. Dieser Wert zeigt an, ob sich der Boden- bzw. Grundwasserspeicher im Verlauf eines Wasserwirtschaftsjahres regeneriert oder ob ein Verlust des Speichers stattgefunden hat. Es ist ersichtlich, dass insbesondere das Wasserwirtschaftsjahr 2018 ein erhebliches Defizit in die Speicherbilanz bringt. In den darauffolgenden Jahren wurde der Speicher nur minimal wieder aufgefüllt.

Außerdem sieht man, dass selbst in den nassen Jahren sich der Boden-/Grundwasserspeicher nicht über 57 mm/a erholt, obwohl wie in Abbildung 6-4 zu sehen ist, ein Netto-Niederschlagseintrag von bis zu 342 mm verzeichnet werden kann. Dies ist auf den ausgeprägten Basisabfluss infolge der dichten Entwässerungsgräben sowie der hohen hydraulischen Durchlässigkeit der Halternen Sande zurückzuführen. Konkret bedeutet dies, dass das verfügbare (und damit auffüllbare) Speichervolumen aufgrund der Anbindung an das Gewässernetz und die Drainagen aktuell limitiert stark begrenzt ist. Zudem kann Wasser nicht über längere Zeiträume im Grundwasserleiter gehalten werden, da es durch den hochdurchlässigen Sandaquifer in relativ hohen Geschwindigkeiten zu den Gewässern abfließt. Infolgedessen könnte sich der saisonale bzw. mehrjährige Wasserrückhalt in diesem Gebiet als schwierig gestalten. Möglicherweise müssten weitere andere Speicheroptionen, wie Rückhaltebecken, eingesetzt werden oder eine Steuerbarkeit der Bauwerke für den Wasserrückhalt in gegeben vorhanden sein.

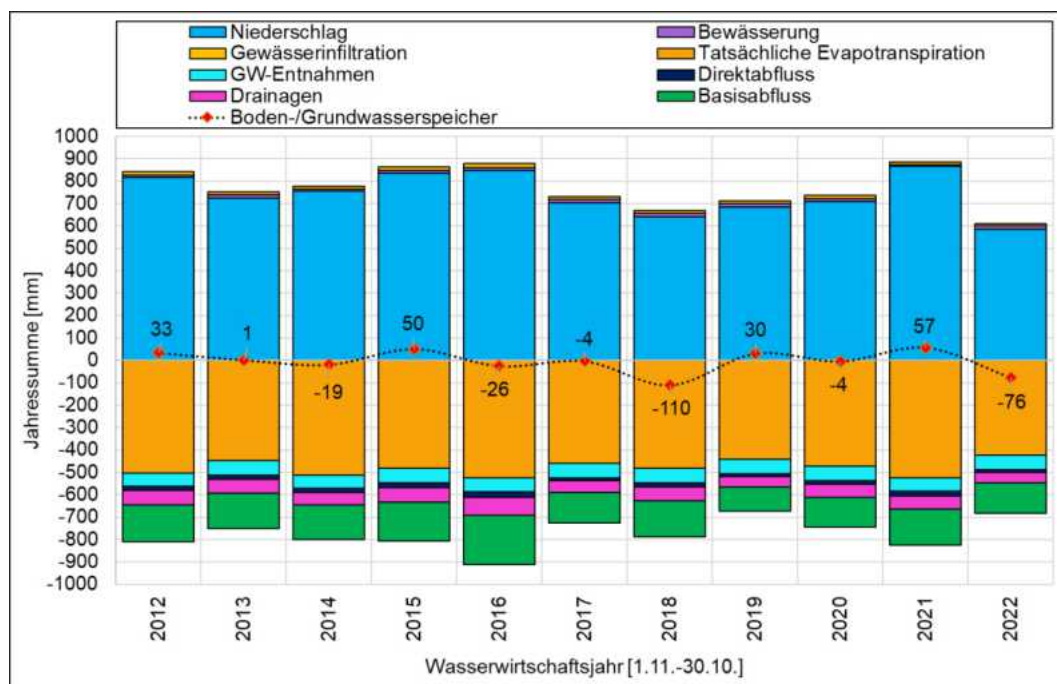


Abbildung 6-5: Wasserbilanzsummen der Wasserwirtschaftsjahre 2012 bis 2022.

Für eine genauere Betrachtung der Grundwasserneubildung und der Quantifizierung der Grundwassermengen wurde zusätzlich eine Grundwasserbilanz erstellt (siehe Abbildung 6-6). Hier sind alle Bilanzgrößen des Grundwasserkörpers dargestellt. Der Grundwasserspeicher spiegelt die Differenz der einzelnen Komponenten wider. Hier wird im Vergleich zu Abbildung 6-5 der Bodenspeicher der ungesättigten Zone nicht miteingerechnet. Mithilfe dieser Graphik soll unter anderem gezeigt werden, dass Grundwasserneubildung nicht als separate Größe diskutiert werden sollte, sondern als Bilanz unter Berücksichtigung der Abflüsse.

Ein Beispiel hierfür ist das Wasserwirtschaftsjahr 2016. Obwohl die Grundwasserneubildung im Vergleich zum Vorjahr höher ausfällt, wurde der

Grundwasserspeicher nicht aufgefüllt, sondern weist sogar eine leicht negative Bilanz auf. Dies liegt daran, dass der Speicher im Modellgebiet bereits im Jahr 2015 weitgehend aufgefüllt war. Infolgedessen stand im darauffolgenden Jahr kein Speichervolumen mehr für die zusätzliche Grundwasserneubildung zur Verfügung, sodass das Wasser stattdessen über den Basisabfluss verloren ging.

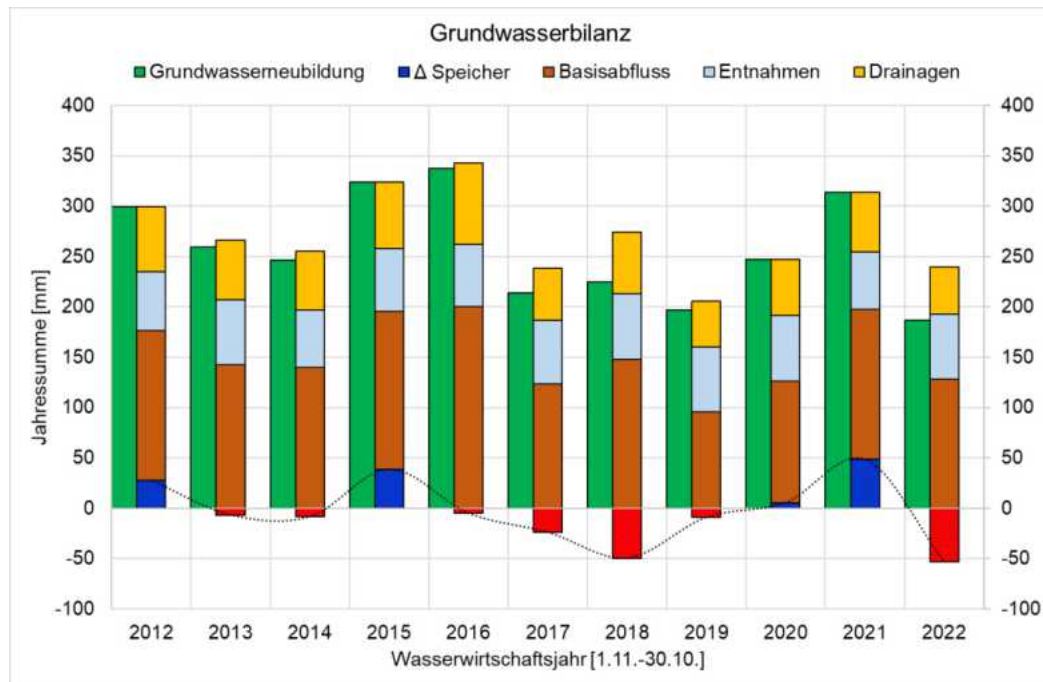


Abbildung 6-6: Grundwasserbilanz der Wasserwirtschaftsjahr 2012 bis 2022.

Für das Modellgebiet wurde zusätzlich eine Gesamtwasserbilanz über den kompletten Simulationszeitraum ermittelt. Diese veranschaulicht die internen Wasserflüsse und Austauschmengen zwischen den einzelnen Wasserhaushaltskomponenten und entsprechen der gemittelten Werte der bereits gezeigten Bilanzen (s. Abbildung 6-7). Der Direktabfluss macht im Modellgebiet 7% Gesamtabflusses aus und wird im Modell über den 2D-Oberflächenabfluss ermittelt.

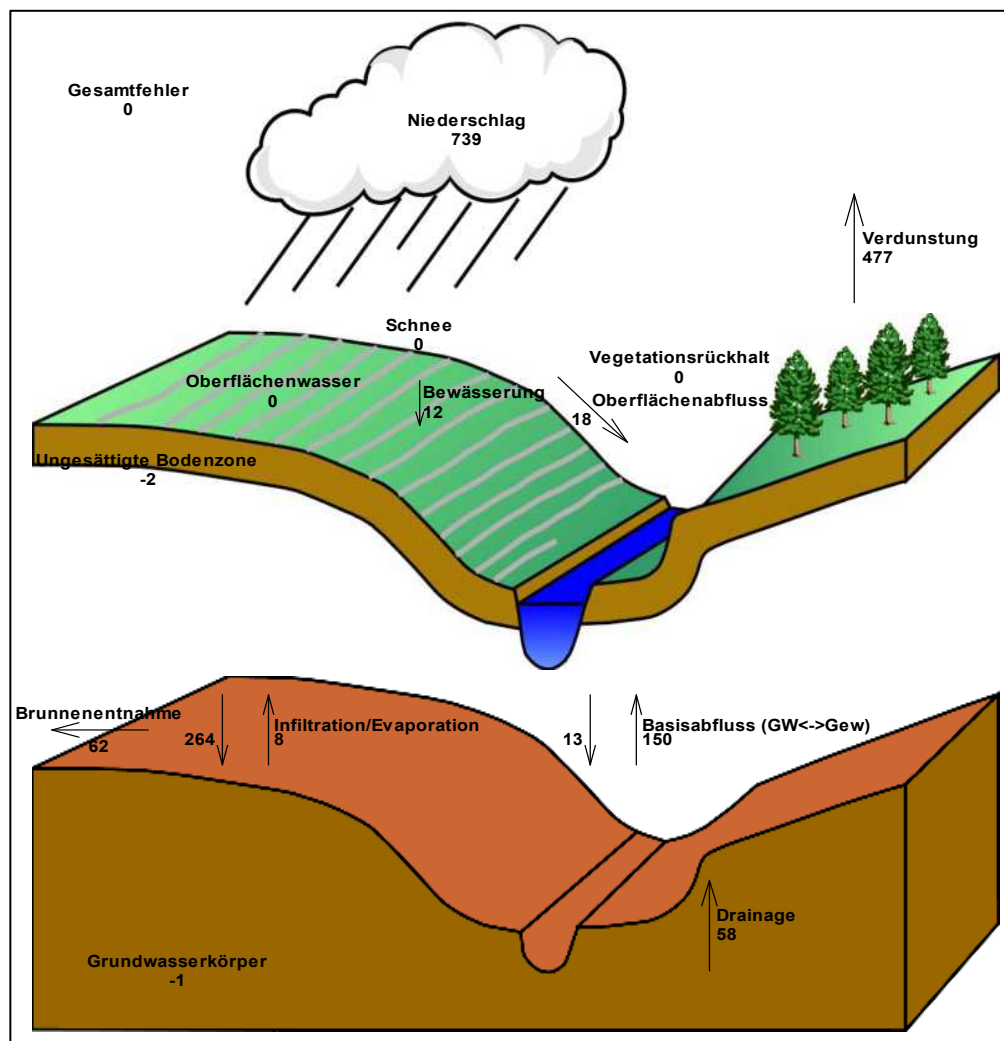


Abbildung 6-7: Resultierende Wasserbilanz auf durchschnittliche Jahressummen umgerechnet.

7 Szenarien – Maßnahmen zum Wasserrückhalt

Mit der erfolgreichen Kalibrierung des Modells konnte dieses für die Berechnung und Auswertung von Szenarien verwendet werden. Das Ziel dieser Szenarien ist es, die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen in Bezug auf den Wasserrückhalt zu analysieren und quantifizieren. Dafür wurden die Maßnahmen zum einen für den Zeitraum 2011-2022 simuliert, um einen Vergleich gegenüber des Referenzzustands des kalibrierten Modells herzustellen. Zusätzlich wurden zwei weitere Referenzzustände definiert und berechnet, um sowohl trockene als auch anhaltende nasse Bedingungen zu simulieren. Die entsprechenden Maßnahmen werden dann mit diesen Referenzzuständen ebenfalls verglichen.

Eine Zusammenfassung der gerechneten und ausgewerteten Szenarien ist in Tabelle 7-1 aufgeführt. Die Szenarien und deren Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben. Alle Szenarien wurden mit dem methodischen Bewässerungsansatz aus Kapitel 4.5.3 gerechnet.

Tabelle 7-1: Überblick der Szenarien.

Szenario	Beschreibung
Referenzszenario IST (Kalibrierungslauf)	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: Messdaten Maßnahmen: Keine Entnahmen: Messdaten bzw. wo fehlend Mittelwerte
Referenzszenario Trocken	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Trockenjahr 2018 über 3 Jahre wiederholt Maßnahmen: Keine Entnahmen: Max. Genehmigte
Referenzszenario Nass	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahmen: Keine Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022
Szenario - Statische Wehrbauwerke IST Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahmen: Alle Wehre (trockenfallende Gewässer) ohne Steuerung Entnahmen: IST-Zustand
Szenario - Statische Wehrbauwerke Trocken Vergleich mit Referenzszenario Trocken	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Trockenjahr 2018 über 3 Jahre Maßnahmen: Alle Wehre (trockenfallende Gewässer) ohne Steuerung Entnahmen: Max. Genehmigte
Szenario - Statische Wehrbauwerke Nass Vergleich mit Referenzszenario Nass	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahmen: Alle Wehre (trockenfallende Gewässer) ohne Steuerung Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke IST – Sommer 40 cm Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer auf 40 cm über Gewässerbett

Szenario	Beschreibung
	Entnahmen: IST-Zustand
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Trocken – Sommer 40 cm Vergleich mit Referenzszenario Trocken	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Trockenjahr 2018 über 3 Jahre Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer auf 40 cm über Gewässerbett Entnahmen: Max. Genehmigte
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Nass – Sommer 40 cm Vergleich mit Referenzszenario Nass	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer auf 40 cm über Gewässerbett Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke IST – Sommer offen Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer offen Entnahmen: IST-Zustand
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Trocken – Sommer offen Vergleich mit Referenzszenario Trocken	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Trockenjahr 2018 über 3 Jahre Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer offen Entnahmen: Max. Genehmigte
Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Nass – Sommer offen Vergleich mit Referenzszenario Nass	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahme: Wehre mit Steuerung (trockenfallende Gewässer) - Winter zu, Sommer offen Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022
Szenario - Grabenaufschüttung und Drainageverschluss IST Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahme: Aufschüttung kleinerer Entwässerungsgräben und Verschluss Drainagen Entnahmen: IST-Zustand
Szenario – Grabenaufschüttung und Drainageverschluss Trocken Vergleich mit Referenzszenario Trocken	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Trockenjahr 2018 über 3 Jahre Maßnahme: Aufschüttung kleinerer Entwässerungsgräben und Verschluss Drainagen Entnahmen: Max. Genehmigte
Szenario – Grabenaufschüttung und Drainageverschluss Nass Vergleich mit Referenzszenario Nass	Drainagen im ganzen Modellgebiet Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahme: Aufschüttung kleinerer Entwässerungsgräben und Verschluss Drainagen Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022

Szenario	Beschreibung
Szenario - Lokalen Maßnahmen im Fellerhofgraben IST Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahmen: Lokale Stauwehre im Fellerhofgraben Entnahmen: IST-Zustand
Szenario - Lokalen Maßnahmen im Fellerhofgraben Nass Vergleich mit Referenzszenario Nass	Simulationszeitraum: Vorhersage 3 Jahre Klimadaten: Nassjahr 2023 Maßnahmen: Lokale Stauwehre im Fellerhofgraben Entnahmen: Durchschnittswerte 2011-2022
Szenario - Lokalen Maßnahmen im Hungerbach IST Vergleich mit Referenzszenario IST	Simulationszeitraum: 2011-2022 Klimadaten: IST-Zustand Maßnahmen: Lokale Stauwehre im Hungerbach Entnahmen: IST-Zustand

7.1 Referenzszenario Trocken

In diesem Szenario wird eine instationäre Simulation durchgeführt, die sich über einen Prognosezeitraum von drei Jahren erstreckt. Dabei werden die Klimadaten des Trockenjahrs 2018 über drei Jahre aneinandergereiht. Damit soll ein extremer Zustand abgebildet werden, welcher dennoch auf realen Klimadaten basiert. Die Simulation dient als Vergleichsszenario ohne Maßnahmen. Die Wasserentnahmen sind in maximal genehmigtem Umfang angesetzt. Die Bewässerung wird automatisiert nach dem Ansatz des kalibrierten Modells berechnet. Folgende Ergebnisse ergeben sich:

Abbildung 7-1 zeigt, dass im ersten Jahr der Boden- und Grundwasserspeicher stark entleert wird. Im zweiten Jahr sind es dann nur noch 52 mm/Jahr Verluste, da der Basisabfluss durch niedrigere Grundwasserstände abnimmt. Im dritten Jahr ist dieser Effekt weiterhin zu sehen. Die genehmigten Bewässerungsmengen werden in allen Jahren voll ausgeschöpft, da die Bodenfeuchte in den Sommermonaten durch die geringen Niederschläge nicht über dem Schwellenwert gehalten wird. Die tatsächliche Evapotranspiration reduziert sich vom ersten ins zweite Jahr um 11 mm/Jahr und dann um weitere 4 mm/Jahr im dritten Jahr. Dies hängt damit zusammen, dass die Böden nach Aufbrauchen der genehmigten Bewässerungsmengen so weit austrocknen, dass kein Wasser mehr an der Oberfläche verdunsten kann. Lediglich die tieferwurzelnden Bestände tragen dann mit der Transpiration zur Gesamtverdunstung teil. In der monatlichen Wasserbilanz sieht man zudem, dass die genehmigte Bewässerungsmenge bereits im Juli komplett aufgebraucht ist.

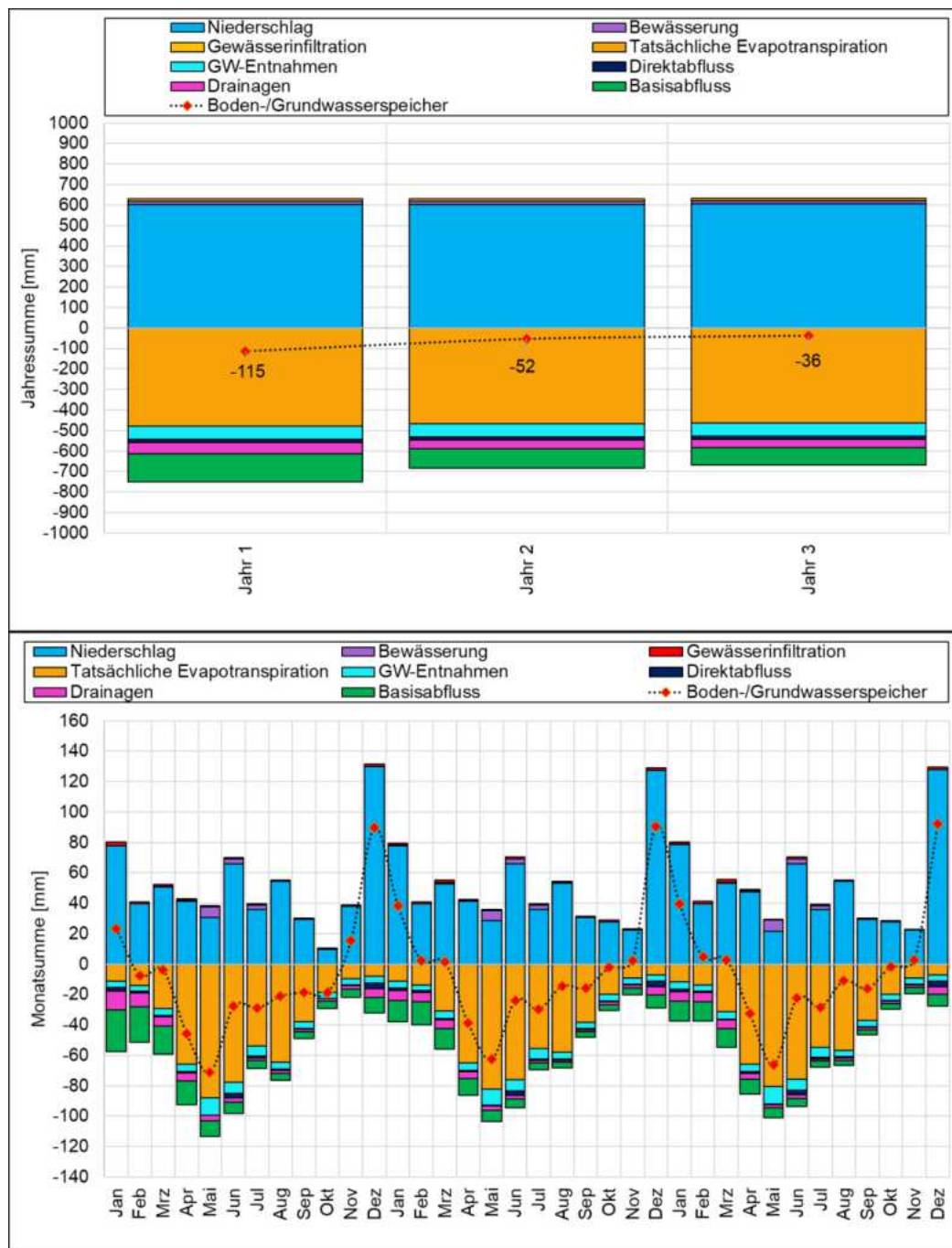


Abbildung 7-1: Wasserbilanz Referenzszenario Trocken - 3-jährige Trockenperiode in Folge.
Oben: Jährlich gemittelte Bilanz. Unten: Monatlich gemittelte Bilanz.

7.2 Referenzszenario Nass

Dieses Szenario beruht ebenfalls auf einem dreijährigen Prognosezeitraum. Die Klimadaten stammen aus dem Jahr 2023, welches besonders niederschlagsreich gewesen ist. Damit wird ein dreijähriges Nass-Szenario auf Basis eines realen Klimajahres abgebildet. Auch hier werden keine wasserwirtschaftlichen Maßnahmen angesetzt, da das Szenario als Vergleichszustand für die Maßnahmen-szenarios dient. Die Entnahmen erfolgen anhand der durchschnittlichen Werte aus den Jahren 2011 bis

2022. Die Bewässerung wird wie auch im Referenzszenario „Trocken“ automatisiert nach dem Ansatz des kalibrierten Modells berechnet.

In den Ergebnissen der Wasserbilanz (Abbildung 7-2) sieht man den Effekt der drei Nassjahren in Folge. Im ersten Jahr füllt sich der Boden- und Grundwasserspeicher stark auf (210 mm/a). In den anschließenden Jahren kann der Grundwasserleiter immer weniger zusätzlich aufnehmen und der größte Anteil des Niederschlags fließt als Basisabfluss über die Gewässer ab. Auch der Direktabfluss nimmt vom ersten Jahr zum dritten Jahr um 10 mm/Jahr zu. In der monatlichen Bilanzzeitreihe ist zu erkennen, dass aufgrund des trockenen Frühlings von März bis Juni, Anfang Juni die Bodenfeuchte unter die Bewässerungsschwelle fällt.

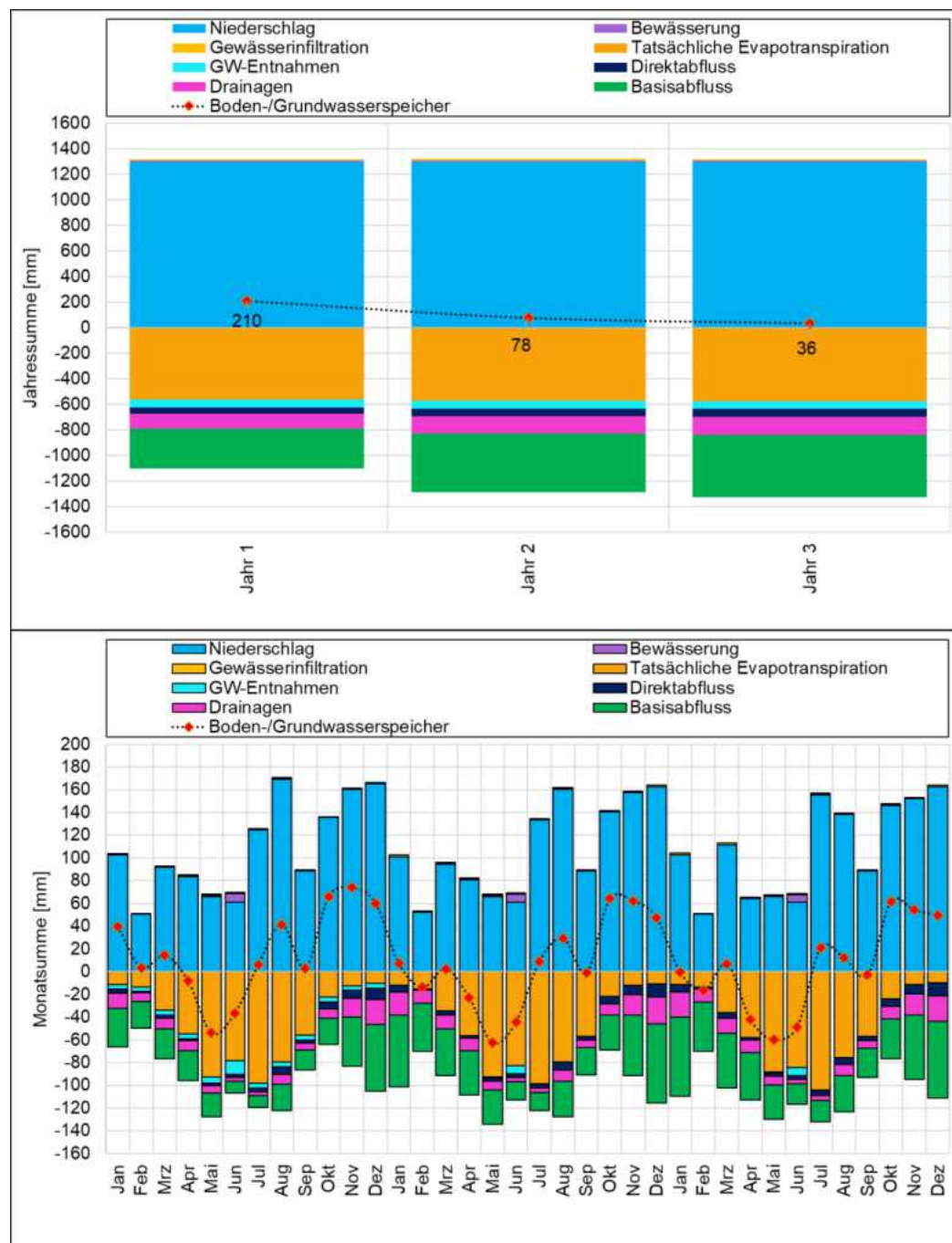


Abbildung 7-2: Wasserbilanz Referenzszenario 3-jährige Nassperiode in Folge.
Oben: Jährlich gemittelte Bilanz. Unten: Monatlich gemittelte Bilanz.

7.3 Szenario - Statische Wehrbauwerke

In den Szenarien der Kapitel 7.3 bis 7.5 wurden zahlreiche Wehrbauwerke in das Modell eingebaut, um das Potenzial von Stauwehren für den Wasserrückhalt zu bewerten. Dafür wurden die Wehrbauwerke in den einzelnen Simulationsläufen auf verschiedene Anstauhöhen eingestellt. Die einzelnen Maßnahmen werden in allen Szenarien immer für drei Szenarien simuliert:

- unter realen historischen Klimabedingungen für den Zeitraum 2011 bis 2022 mit Vergleich zum kalibrierten Modell als IST-Referenzzustand,
- unter trockenen Bedingungen mit Vergleich zum Referenzszenario Trocken
- und unter nassen Bedingungen mit Vergleich zum Referenzszenario Nass.

Für die Wahl der Standorte der Stauwehre wurden aufgrund der ökologischen Vorgaben zur Einhaltung der Durchgängigkeit lediglich Gewässer bzw. Gewässerabschnitte ausgewählt, welche mindestens einmal im Jahr trockenfallen. Dabei handelt es sich vorrangig um Entwässerungsgräben. Zur Identifizierung dieser Stellen anhand des Abflusses wurden die Ergebnisse des Referenz IST-Zustands herangezogen.

Die maximale Höhe der Wehroberkanten wurde so festgelegt, dass diese immer einige Zentimeter unterhalb der Höhen der rechten und linken Böschungsoberkante der Ufer bleibt, um ein Überlaufen der Gräben zu vermeiden. Um die Effizienz der Wehre zu maximieren, wurde versucht, möglichst viele dieser Bauwerke in optimalem Abstand zueinander zu platzieren. In den meisten Fällen bedeutete dies, dass in Fließrichtung flussaufwärts die Sohle des nächsten Wehrs nur wenige Zentimeter über dem maximalen Wasserspiegel des flussabwärts gelegenen Wehrs lag (siehe Abbildung 7-3). Die Standorte der Wehre sind in den Ergebniskarten der folgenden Kapitel dargestellt.

In diesem Kapitel werden als erstes Szenario die Wehre statisch mit maximaler Anstauhöhe angesetzt. In den nachfolgenden Kapiteln werden dann dieselben Wehrbauwerke mit einer saisonalen Steuerung analysiert.

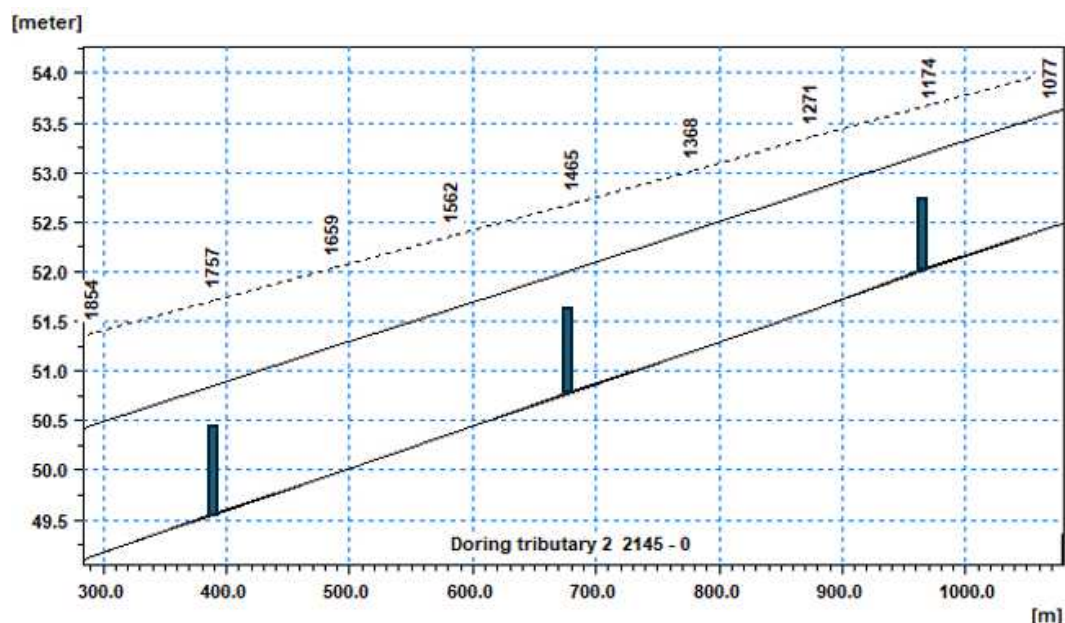


Abbildung 7-3: Beispielhaftes Längsprofil eines Grabenabschnittes mit modellierten Wehrbauwerken. Die oberhalb verlaufenden Linien entsprechen den Grabenschultern (gestrichelt – links, durchgezogen rechts Richtung stromabwärts).

7.3.1 Vergleich Referenzlauf 2011-2022

Für die Bewertung der Wirksamkeit der Wehre wurde eine Karte mit den Grundwasserdifferenzen erstellt (Abbildung 7-4). Dadurch kann beurteilt werden, wo die Maßnahme lokal zu einem Anstieg des Grundwassers führt. Zudem wird unterhalb von jedem modellierten Wehrbauwerk die Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzzustand angegeben. Positive Werte bedeuten, dass sich der Abfluss im Vergleich zum Referenzzustand verringert hat und somit Wasser zurückgehalten wurde. Negative Werte hingegen zeigen, dass sich der Abfluss durch die Maßnahme erhöht.

In der Abbildung 7-4 ist zu sehen, dass die Wehre lokal unterschiedliche Effekte erzielen. Vor allem im Süden sind lokal signifikante Effekte zu erkennen, mit Rückhaltevolumen von bis zu 20 Tsd. m³/Jahr und Grundwasseranhebungen bis zu 70 cm. Weiter stromabwärts des Döringbachs sind nur geringe Effekte zu erkennen. Dies liegt an den hohen Flurabständen in diesen Bereichen, wodurch generell durch die fehlende Anbindung an das Grundwasser geringere Abflüsse auftreten. In diesen Bereichen wird daher größtenteils nur der Direktabflussanteil zurückgehalten. Um diesen Effekt einordnen zu können wurde der Direktabflussanteil des IST-Zustands analysiert. Das Ergebnis zeigt, dass dieser im Modellgebietsdurchschnitt 7% des Gesamtabflusses ausmacht.

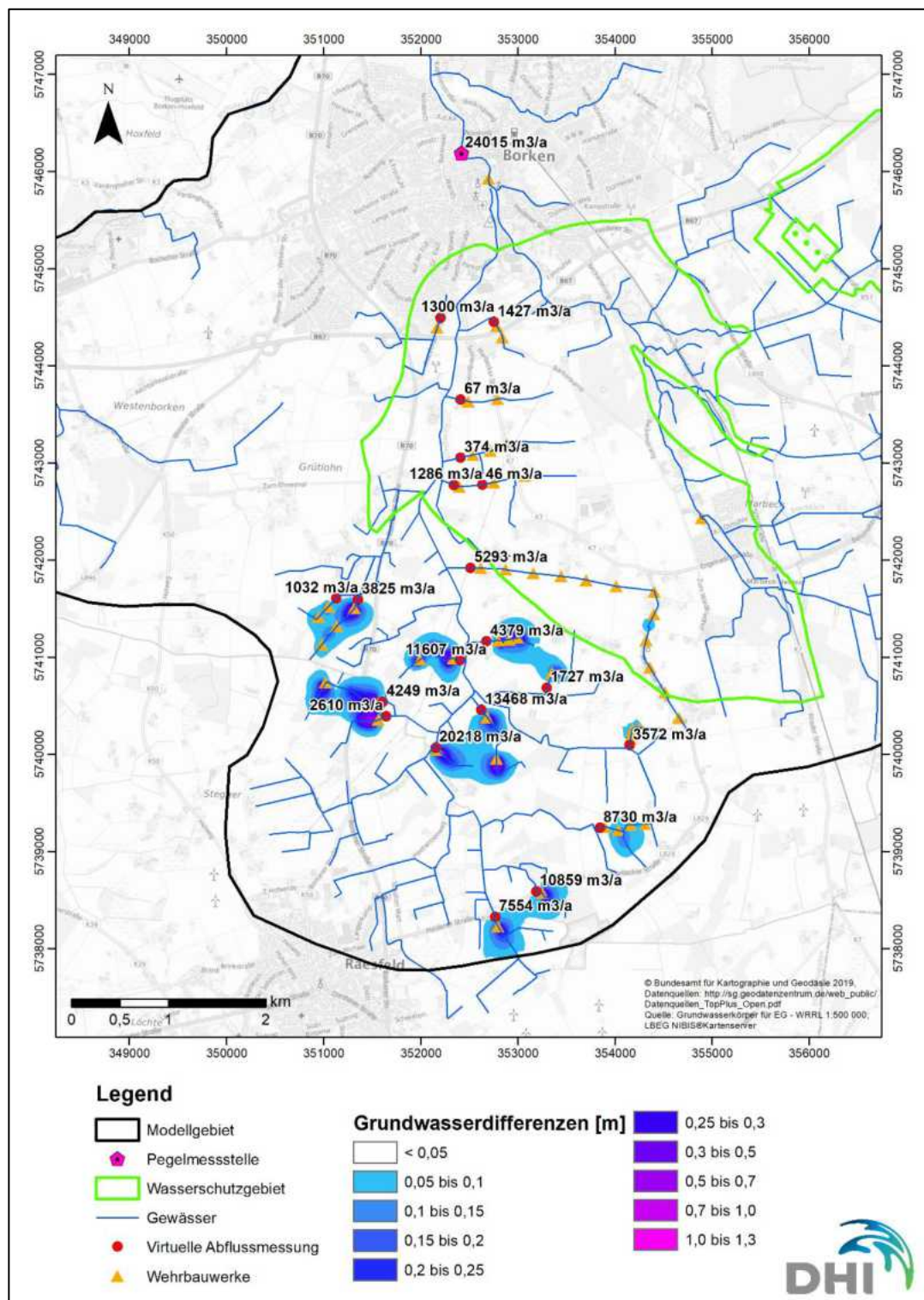


Abbildung 7-4: Maßnahme Statische Wehrbauwerke - Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

Betrachtet man die Abflussdifferenzen, zeigt sich, dass die summierte Menge der einzelnen Maßnahmen größer ist als die am Pegel Stadt Borken (pinkes Fünfeck) gemessene Abflussreduktion. Die Gesamtkapazität des Wasserrückhalts durch die ergriffenen Maßnahmen kann nicht durch die Summe der einzelnen Abflussdifferenzen bestimmt werden. Dies liegt daran, dass die lokale Grundwasseranreicherung zu einer Unterströmung der Wehrbauwerke führt, wodurch ein Teil des zurückgehaltenen Grundwassers flussabwärts wieder in das Gewässerbett exfiltriert. Zudem erfolgt in vielen südlichen Bereichen die Ableitung des überschüssigen Grundwassers über angrenzende, oft nicht durch Wehrbauwerke regulierte Gewässer. Daher wird der Abflusspunkt der Pegelmessstelle Stadt Borken (pinkes Fünfeck) als Referenzpunkt für den Gesamtwasserrückhalt durch die Maßnahmen im Gebiet genutzt. Dieser liegt weit genug von den Maßnahmen entfernt, um belastbare Aussagen über die Wirksamkeit dieser auf das Gebiet zu treffen. Hier zeigt sich für die Maßnahmen der statischen Wehre ein Ergebnis von durchschnittlich rund 24 Tsd. m³ zurückgehaltenem Wasser im Jahr für die Referenzperiode 2011 bis 2022.

Um die Wirkung der Maßnahme weitergehend zu analysieren, wird die Wasserbilanz der einzelnen hydrologischen Bilanzgrößen mit dem Referenzzustand verglichen. Aus den Differenzen ergibt sich die gesamtheitliche Wirkung der Maßnahme auf die einzelnen hydrologischen Prozesse. Diese sind in Abbildung 7-5 dargestellt.

Man erkennt in der Abbildung, dass die Verdunstung sich um etwa 21.000 m³ erhöht, während gleichzeitig 4.566 m³ mehr Grundwasser durch die statischen Wehrbauwerke angereichert wurden. Die erhöhte Verfügbarkeit kommt durch den verringerten Basisabfluss. In Summe belaufen sich die Exfiltrations- und Infiltrationsprozesse zwischen Grundwasser und Gewässer auf eine Abnahme des Basisabflusses von 30 Tsd. m³. Dadurch, dass die Maßnahme sich nur lokal auf den Grundwasserspiegel auswirkt, wird der Bewässerungsbedarf nur geringfügig reduziert.

Die simulierte Maßnahme erzielt damit den gewünschten Effekt der Anreicherung des Grundwassers durch den lokalen Rückhalt. Der Effekt wird durch die erhöhte Verdunstung abgedämpft. Von entscheidender Bedeutung ist daher, dass das lokal zurückgehaltene Wasser zeitnah vor Ort genutzt werden sollte, beispielsweise für Bewässerungszwecke, die Trinkwassergewinnung oder ggf. zwischengespeichert wird. Dies würde die Effizienz der lokalen Maßnahmen weiter erhöhen, da Verluste durch die Unterströmung der Wehrbauwerke sowie durch verstärkte Verdunstung minimiert werden. Zudem muss betont werden, dass die Zunahme der Verdunstung positive Rückkopplungseffekte wie Kühlung und mikroklimatische Effekte bewirken kann, welche im Modell nicht abgebildet werden.

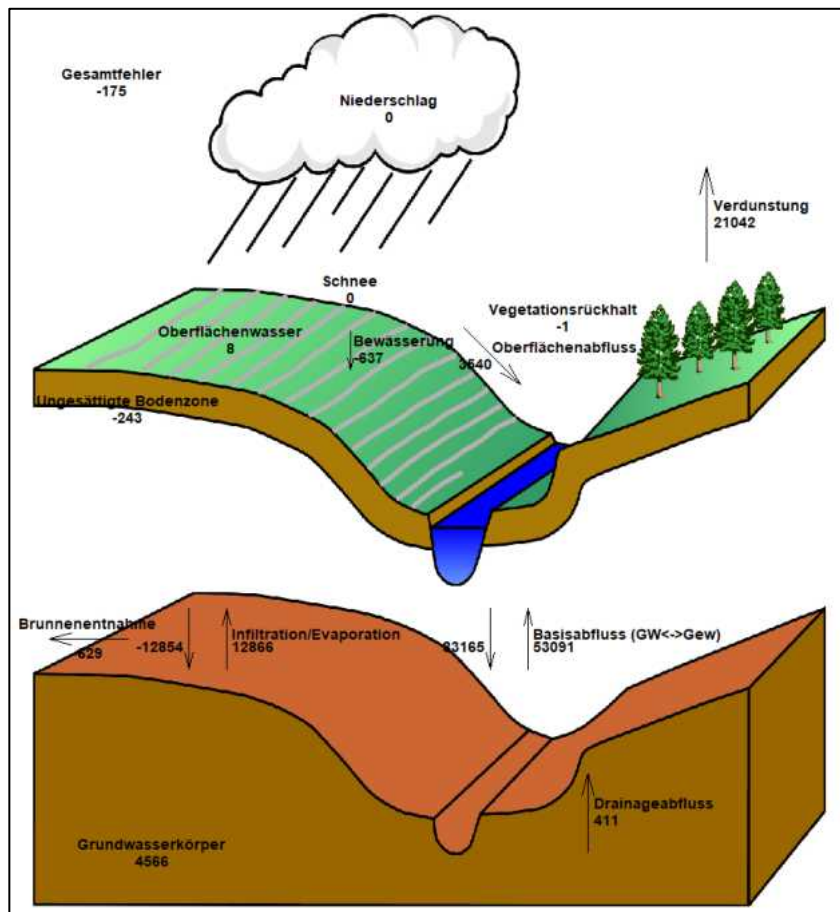


Abbildung 7-5: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.

Mithilfe der beiden vorgestellten Auswertungen wurden sowohl räumliche als auch gesamtheitliche Effekte analysiert und beurteilt. Mit Abbildung 7-6 sollen ergänzend die saisonalen Effekte aufgezeigt werden. Dafür werden ähnlich wie in Abbildung 7-5 die Differenzen der einzelnen Bilanzgrößen zeitlich aufgeschlüsselt dargestellt. Die Wasserwirtschaftsjahre 2018 und 2019 wurden ausgewählt, um den Effekt der Maßnahme in den trockenen Jahren einzuordnen.

Die Abbildung zeigt, wie die zuvor erörterten Effekte zeitlich verlaufen. Im Frühjahr wird durch die Wehrbauwerke der Basisabfluss verringert, während im Sommer ein Teil des zurückgehaltenen Wassers verdunstet. Alle Szenarien mit simulierten Staubawerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

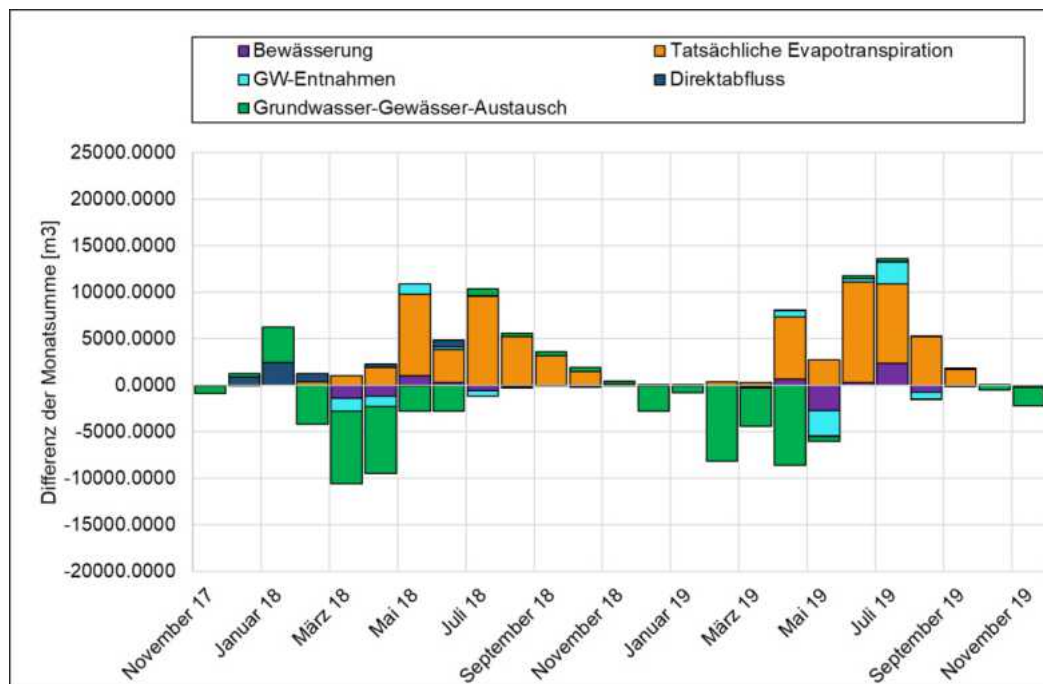


Abbildung 7-6: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand in den Wasserwirtschaftsjahren 2018 und 2019.

7.3.2 Trockenjahr Simulation

Für die Abschätzung der Wirksamkeit der statischen Stauwehre in Trockenjahren wurde das dreijährige Szenario entsprechend den Randbedingungen des Referenzzustand „Trocken“ simuliert (siehe Kapitel 7.1). Die Auswertungen erfolgen identisch zum vorherigen Kapitel. Zuerst werden die räumlichen Effekte anhand der Grundwasser- und der Abflussdifferenzen betrachtet. Diese sind in Abbildung 7-7 dargestellt.

In der Abbildung sieht man, dass die Maßnahmen in der dreijährigen Trockenperiode am Pegel Stadt Borken einen größeren Effekt erzielen. Die Abflussdifferenz bzw. das Rückhaltevolumen beläuft sich hier auf 41.372 m³/Jahr.

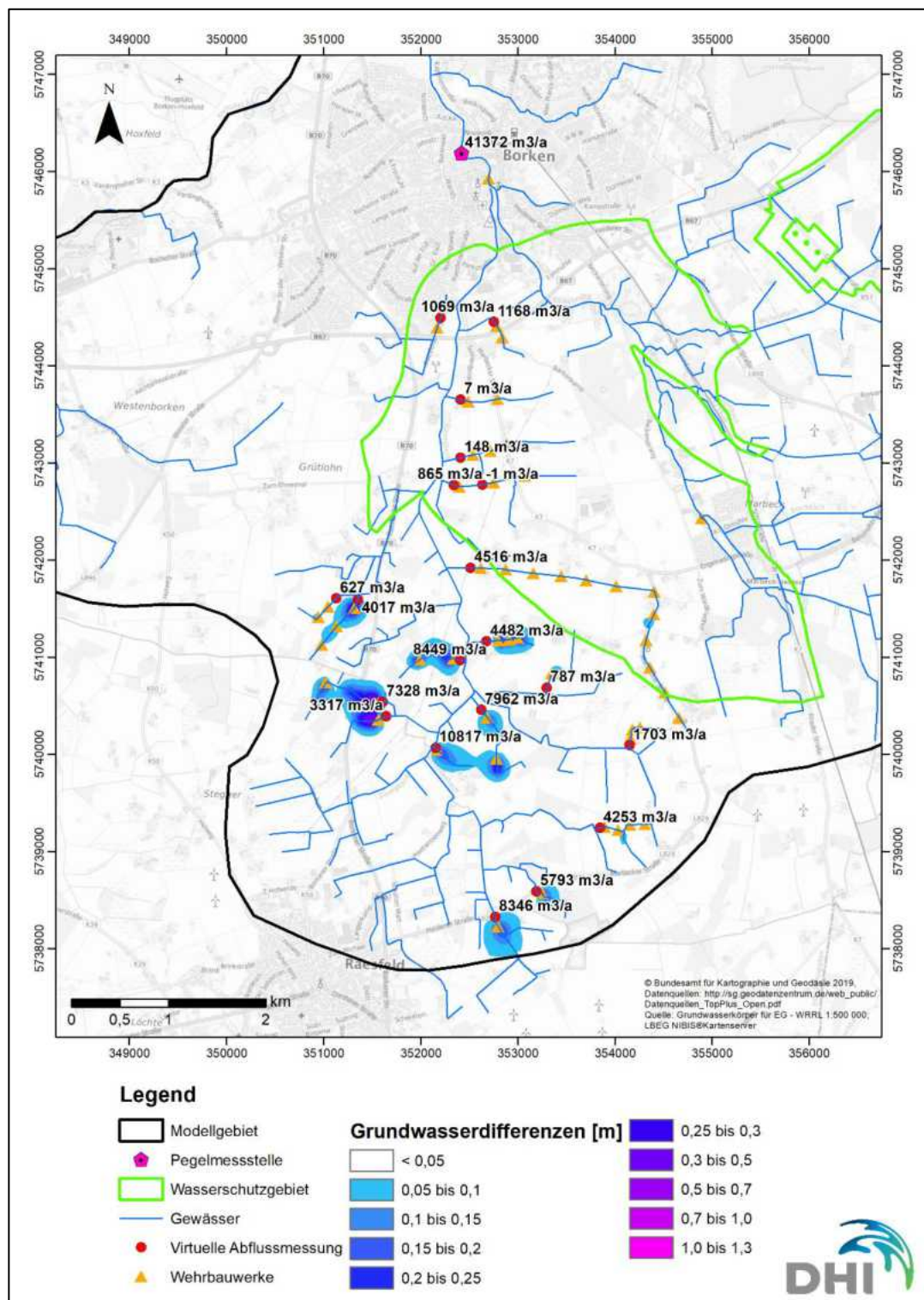


Abbildung 7-7: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenzen im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

In Abbildung 7-8 sieht man, dass die Verdunstung sich auf das ganze Modellgebiet bezogen um 25.549 m³/Jahr erhöht, während gleichzeitig 16.496 m³/Jahr mehr Grundwasser durch die statischen Wehrbauwerke jährlich angereichert werden. Die

Zunahme im Grundwasserspeicher bzw. Verdunstung wird durch eine Abnahme des Basisabflusses um 42.753 m³/Jahr verursacht. Im Vergleich zum Szenario 2011 bis 2022 haben die statischen Wehrbauwerke in sehr trockenen Jahren einen erhöhten Effekt. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Grundwasserspiegel im dreijährigen Trockenszenario generell weit absinken und somit der Basisabflussanteil generell stark reduziert wird. Somit gibt es Kapazitäten vor den Wehren Starkregenereignisse im Sommer zurückzuhalten, wobei die rückgestauten Mengen daraufhin zeitnah infiltrieren. Das durch die Maßnahme zurückgehaltene Wasser wirkt somit verstärkt Grundwasserspeicher auffüllend, anstatt über den Basisabfluss wieder zurück in die Gewässer zu gelangen. Gleichzeitig erzielen die Wehre vor allem im ersten Jahr, in welchem die Grundwasserstände im Frühjahr noch hoch sind, den stärksten Effekt.

Mit den sehr niedrigen Grundwasserspiegeln sinkt über die drei Trockenjahr auch die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser. Daher ist die jährliche Verdunstungszunahme im Vergleich zum Referenzlauf 2011-2022 auch nur geringfügig höher. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

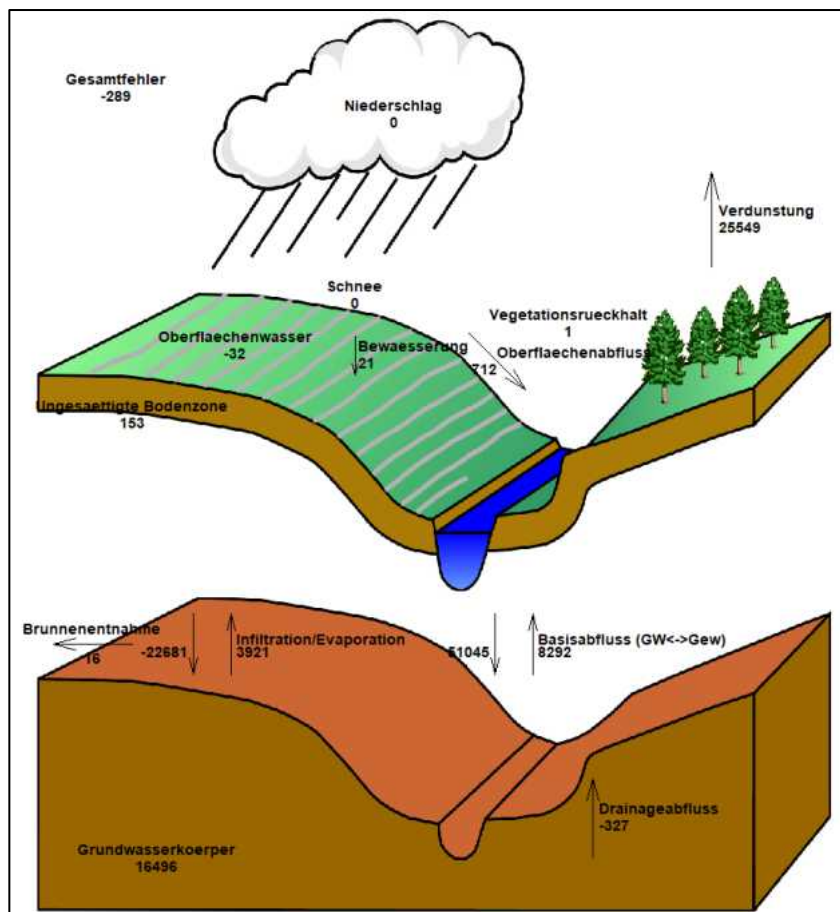


Abbildung 7-8: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.

In der monatlichen Auflösung der Wasserhaushaltsbilanzen (siehe Abbildung 7-9) sieht man in den saisonalen Veränderungen der Wasserbilanz noch weitere Effekte. Vor allem im ersten Jahr zeigt die Maßnahme der statischen Wehrbauwerke die größte Wirkung. In den darauffolgenden Jahren sinkt der Grundwasserspiegel an vielen Wehrbauwerken

unter die Gewässersohle, wodurch die Anbindung ans Grundwasser abbricht. Ab diesem Zeitpunkt wird dann lediglich Direktabfluss zurückgehalten. Daher nimmt der Effekt der Wehrbauwerke in der Abbildung mit jedem trockenem Jahr ab. Ab einem gewissen Punkt würden alle Wehrbauwerke trocken fallen und nur noch bei Oberflächenabfluss in die Gewässer Wirksamkeit zeigen.

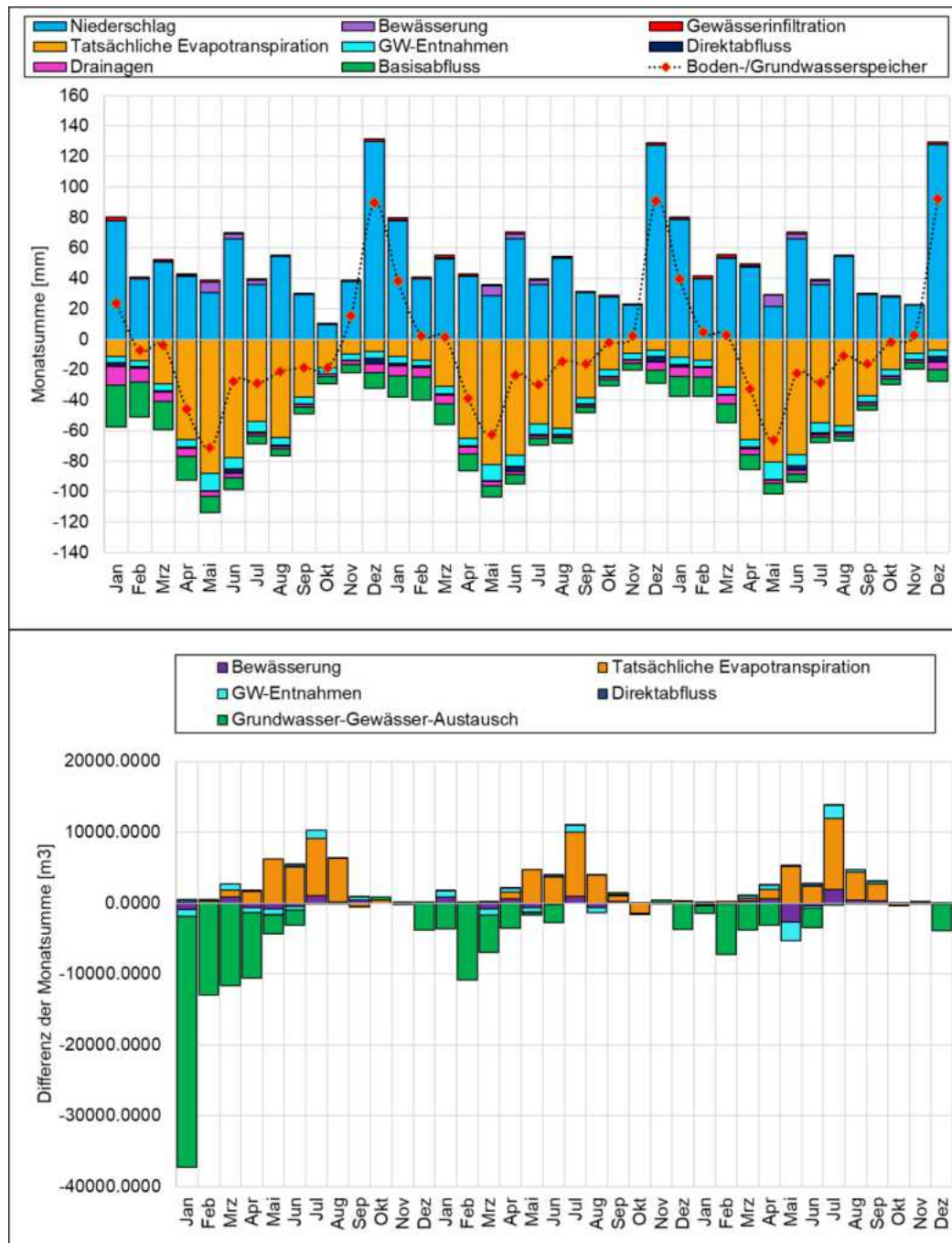


Abbildung 7-9: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre.
Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Trocken“.

7.3.3 Nassjahr Simulation

Mit der Nassjahr-Simulation soll die Wirksamkeit der Maßnahmen unter klimatisch sehr feuchten Bedingungen beurteilt werden. Die Randbedingungen entsprechen denen, des Referenzzustandes Nass (siehe Kapitel 7.2).

In Abbildung 7-10 ist das räumliche Ergebnis der Simulation mit Grundwasser- und Abflussdifferenzen dargestellt. Hier sind nun erstmals Effekte auf das Grundwasser weiter nördlich beim Fellerhofgraben und Hungerbachgraben zu erkennen. Durch die anhaltenden Niederschläge steigen die Grundwasserspiegel, wodurch ab einem bestimmten Punkt eine Anbindung der Gräben ans Grundwasser erfolgt. Ab diesem Zeitpunkt wirken die Stauwehre verstärkt. An einigen Stellen ist zu erkennen, dass das Grundwasser durch den lokalen Anstau an anderen Gräben exfiltriert. Am Pegel Stadt Borken zeigt sich eine Reduzierung des Abflusses um 63.854 m³/Jahr. Damit haben die Wehrbauwerke im Nassszenario den größten Effekt.

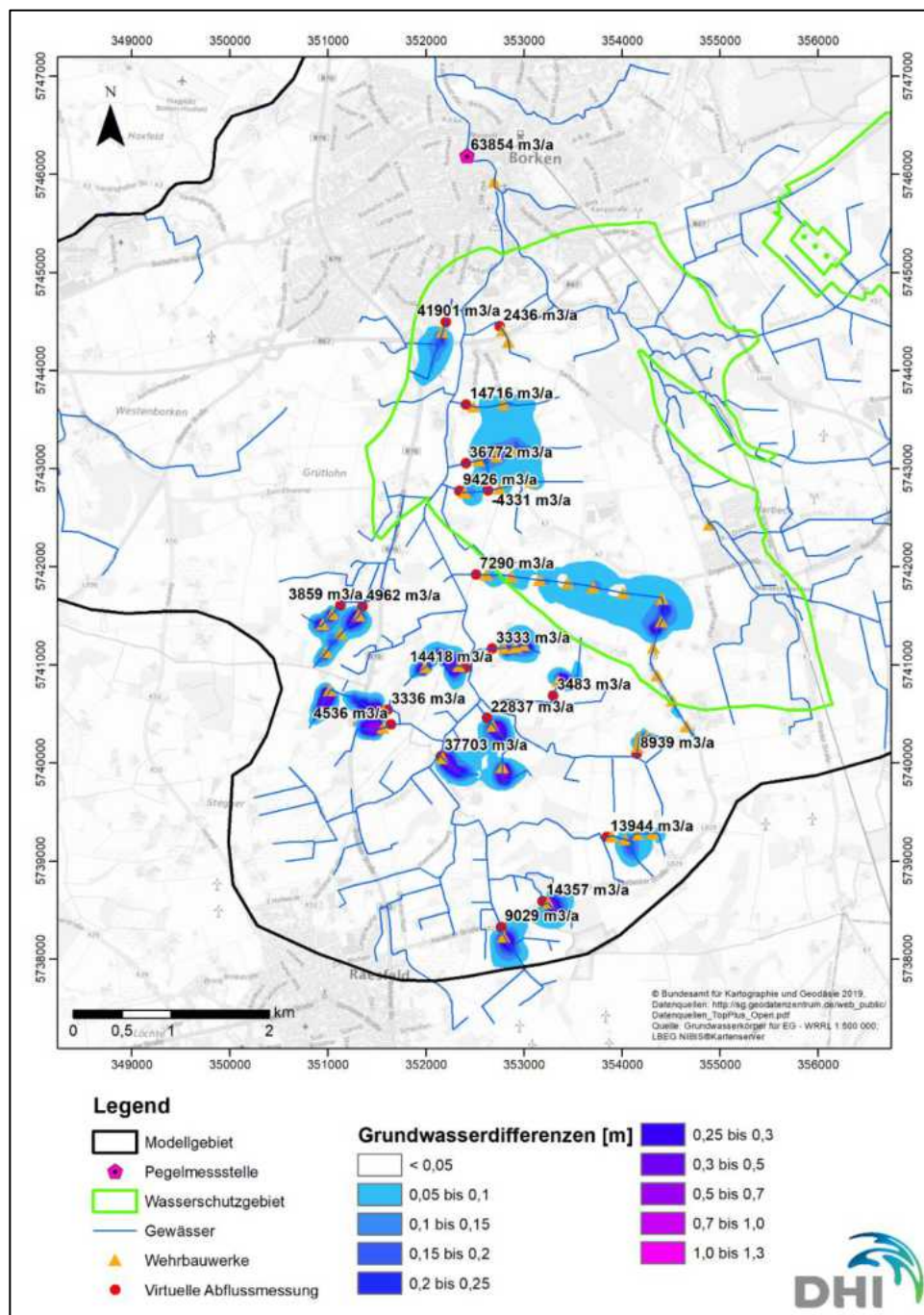


Abbildung 7-10: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

Bei Betrachtung der Wasserbilanz (siehe Abbildung 7-11) zeigt sich, dass der Grundwasserspeicher durch die Maßnahme um etwa 50 Tsd. m³/Jahr aufgefüllt wird. Die Verdunstung nimmt ähnlich dem Referenzlauf 2011-2022 um etwa 22 Tsd. m³/Jahr zu, während der Grundwasser-Gewässeraustausch um 105.549 m³/Jahr reduziert wird. Dabei wird allerdings der Direktabfluss um fast 40.000 m³/Jahr erhöht, was darauf schließen lässt, dass Teilbereiche um die Stauwehre überfluten.

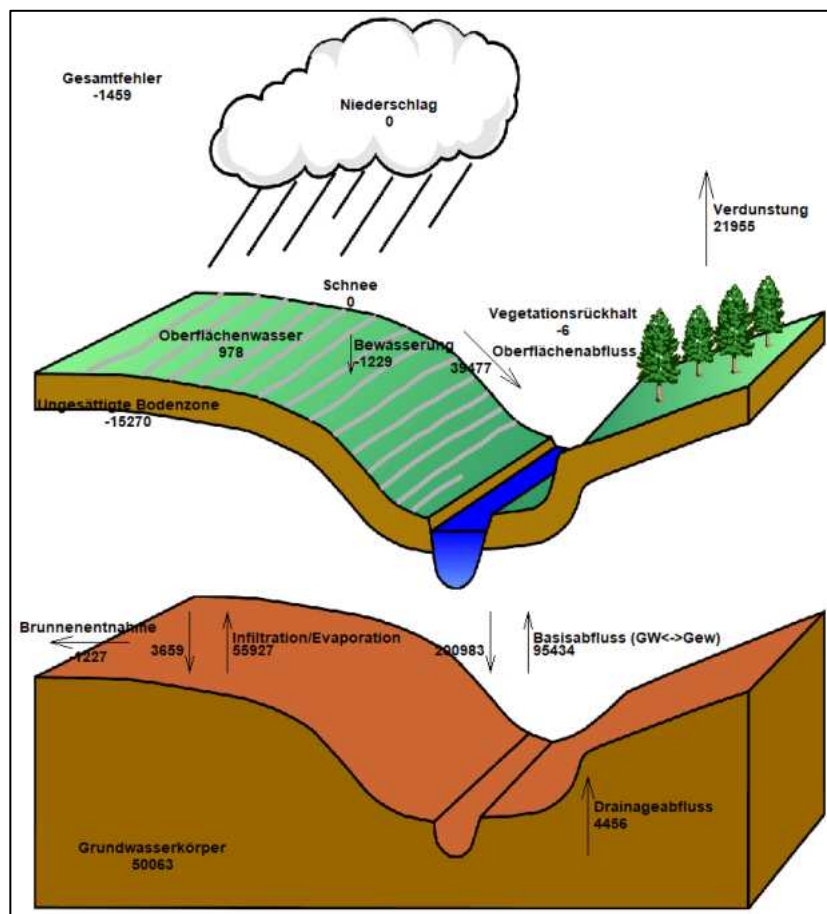


Abbildung 7-11: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.

In der zeitlichen Betrachtung sind diese Effekte saisonal zu erkennen (siehe Abbildung 7-12). In den Wintermonaten nimmt der Basisabflussanteil deutlich ab, während der Direktabflussanteil erhöht ist. Damit liegen die Grundwasserspiegel an den Stauwehren lokal über der Geländeoberkante. Dies wird an den wenigsten Orten im Modellgebiet mit Siedlungsflächen und Anliegern vereinbar sein, weshalb hier das realistische Rückhaltevolumen, mit Öffnung der Wehre bei Überstau, niedriger liegen wird.

Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

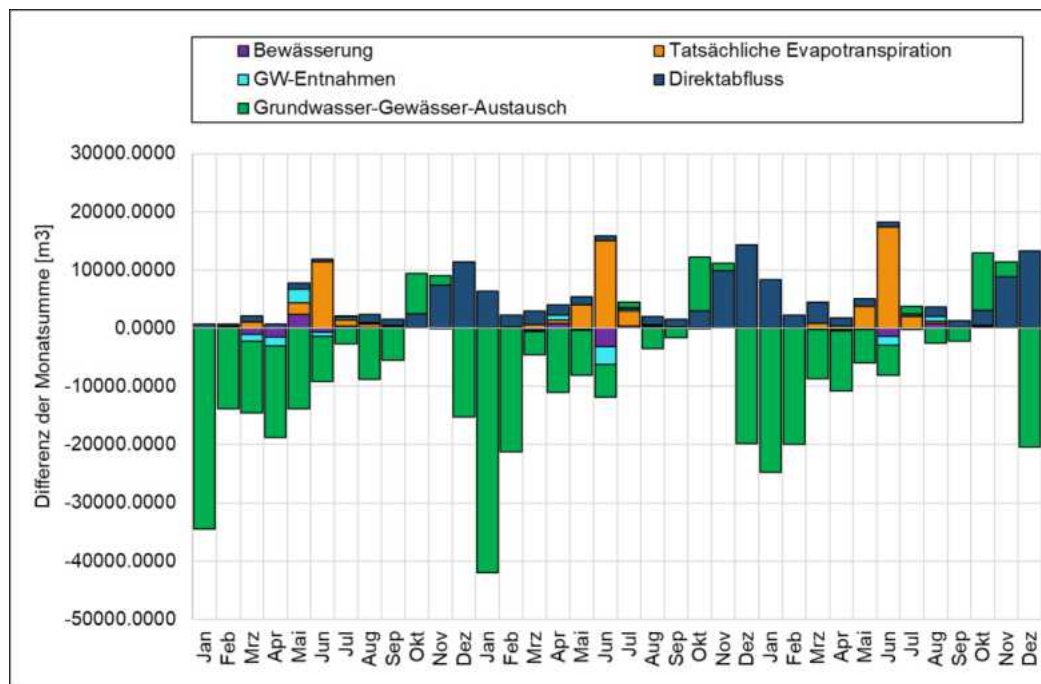


Abbildung 7-12: Maßnahme Statische Wehrbauwerke – Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“.

7.4 Szenario – Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke - Sommer 40cm

Im nächsten Maßnahmenszenario wurden dieselben Randbedingungen angesetzt wie im vorherigen Kapitel. Der einzige Unterschied liegt darin, dass die Wehrbauwerke jedes Jahr ab Mai auf 40cm Stauoberkante herabgesetzt und im November wieder auf Maximalstau hochgesetzt werden. Damit soll untersucht werden, ob die in der Realität häufig angewandte Vorgehensweise der saisonalen Steuerung von Wehrbauwerken im vorliegenden Gebiet zielführend ist. Mit diesem vereinfachten Ansatz soll der manuelle Steuerungsaufwand gering gehalten und gleichzeitig die Befahrbarkeit der Anbauflächen für die Landwirte im Frühjahr sichergestellt werden. Entsprechend dem Vorkapitel wurden drei Szenarien gerechnet: 2011-2022, ein dreijähriges Trockenszenario und ein dreijähriges Nassjahrszenario. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

7.4.1 Vergleich Referenzlauf 2011-2022

Als erstes wird der Vergleich mit dem Referenzlauf 2011-2022 aufgeführt. Dafür wurden die Ergebnisse zu Grundwasser- und Abflussdifferenzen entsprechend der Vorkapitel ausgewertet. An allen Stellen kommt es zu leicht abgeschwächten Effekten im Vergleich zu den statischen Wehrbauwerken. Am Pegel Stadt Borken liegt die Abflussdifferenz bei 16.284 m³/Jahr und damit fast 8 Tsd. m³/Jahr unter der Maßnahme statische Wehrbauwerke.

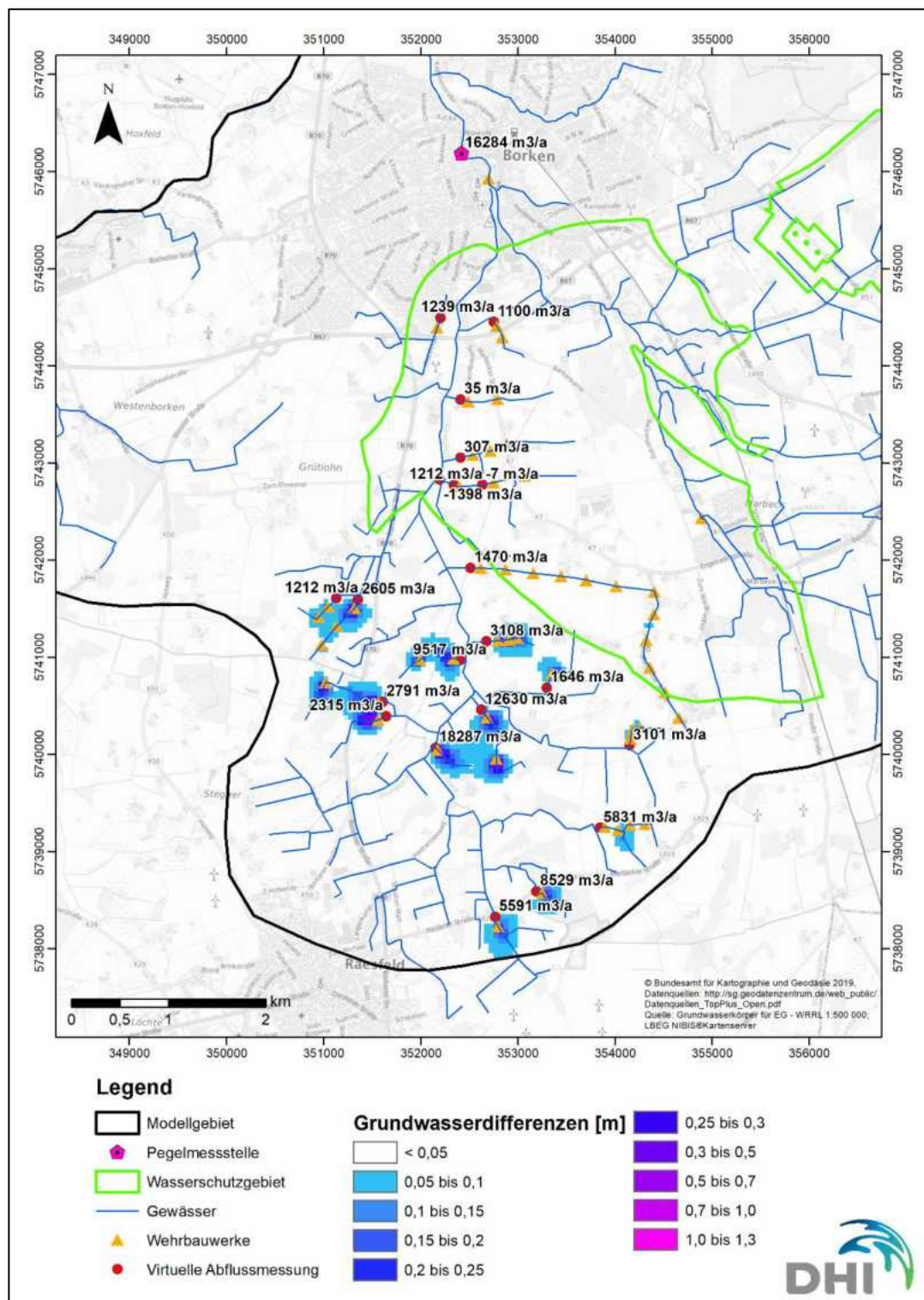


Abbildung 7-13: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 mit Darstellung der Abflusssdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

Trotz geringerem Gewässerrückhalt im Vergleich zu den statischen Wehren ist die Differenz der Wirksamkeit auf den Füllgrad des Grundwasserspeicher nur gering (siehe Abbildung 7-14). Hier liegt der Wert nur etwa 800 m³ unter dem der Maßnahme Statische Wehrbauwerke. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die „Öffnung“ der Wehre im

Mai ein großer Teil des rückgestauten Wassers über die Gewässer abgeführt wird. Dadurch verdunstet gleichzeitig weniger Wasser im Sommer. Dieser Effekt ist in Abbildung 7-15 in den Jahren 2018 und 2019 zu sehen.

Dabei muss betont werden, dass durch diese gegenläufigen Effekte der Verdunstung und des Basisabflusses im Vergleich (statisch und saisonal gesteuert) zwar vergleichbare Grundwasserspeichervolumina erzielt werden, dennoch aber eine höhere Verdunstung dem Gewässerabflussverlust zu bevorzugen ist. Die verdunstete Menge kann nämlich durch Nutzung des rückgestauten Wassers den Bewässerungsbedarf mit abdecken. Gleichzeitig werden durch die Verdunstung lokal die Flächen gekühlt und es kommt zu positiven Rückkopplungseffekten. Gleichzeitig ist das MIKE SHE Modell mit keinem meteorologischen Modell gekoppelt, wodurch die Verdunstungsänderung keinen mindernden Effekt auf die potenzielle Evapotranspiration ausübt. Damit werden diese Rückkopplungseffekte nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend schneiden die Wehrbauwerke mit Herabsetzen auf 40cm ab Mai im Bezug auf den Wasserrückhalt schlechter ab als die Variante der statischen Wehrbauwerke. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

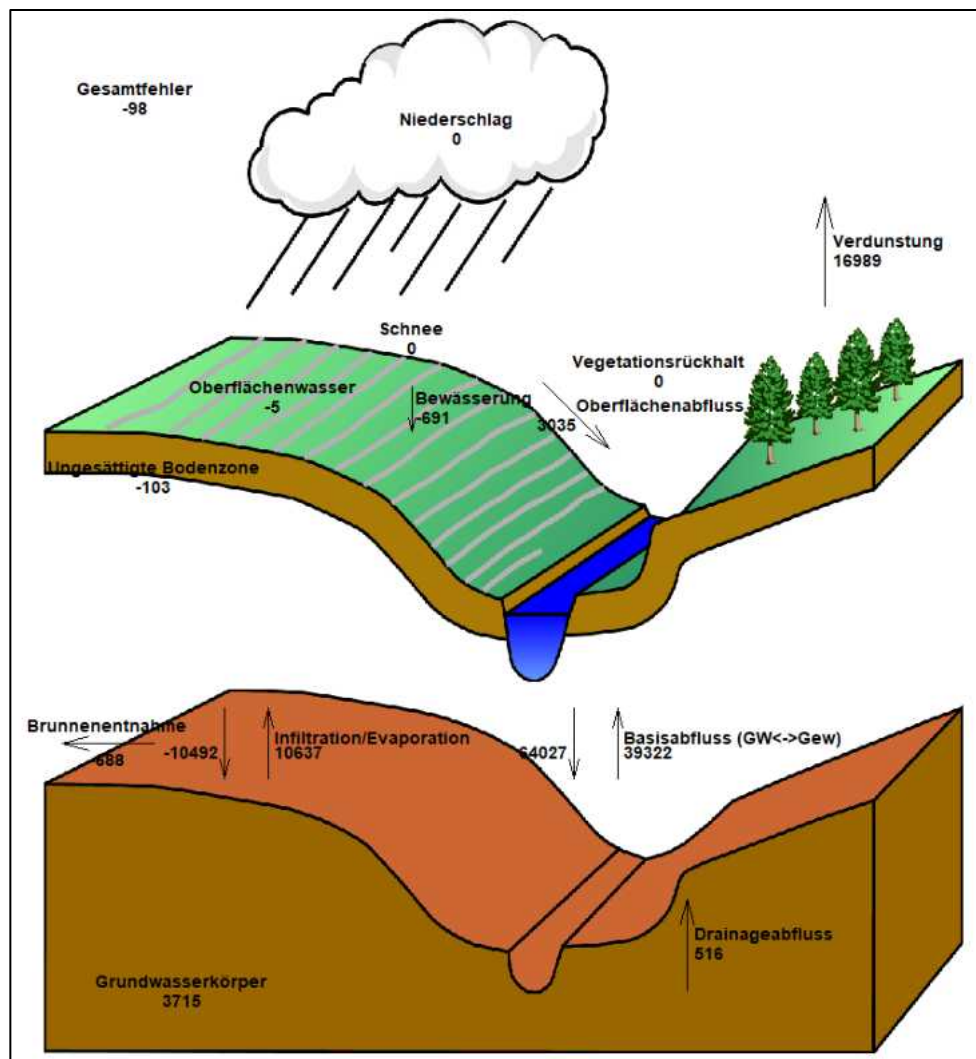


Abbildung 7-14: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.

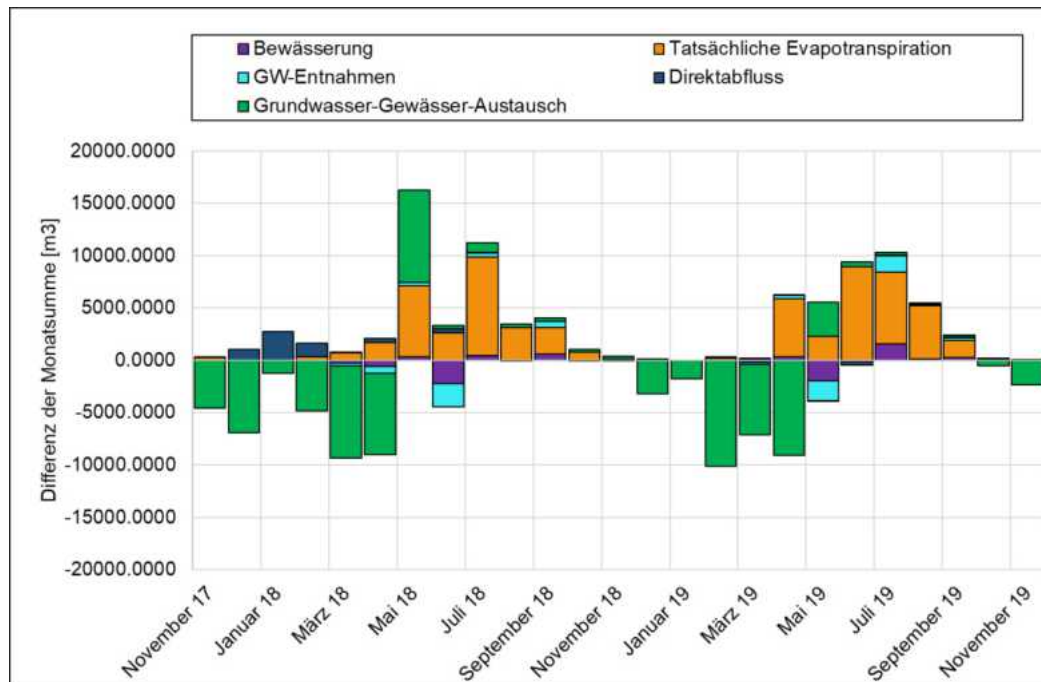


Abbildung 7-15: Maßnahme Saisonale gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.

7.4.2 Trockenjahr Simulation

Für die Abschätzung der Wirksamkeit der saisonal gesteuerten Wehre in extremen Trockenjahren wurde das dreijährige Szenario entsprechend den Randbedingungen des Referenzzustand „Trocken“ simuliert (siehe Kapitel 7.1). Die Auswertungen erfolgen identisch zum vorherigen Kapitel.

Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Vergleich der Maßnahme des vorherigen Kapitels im Zeitraum 2011-2022. Die zurückgehaltene Summe des Abflusses am Pegel Stadt Borken beläuft sich auf 35.408 m³/Jahr und liegt damit etwa 6 Tsd. m³/Jahr unter den Ergebnissen der Trockenjahr Simulation mit statischen Wehrbauwerken.

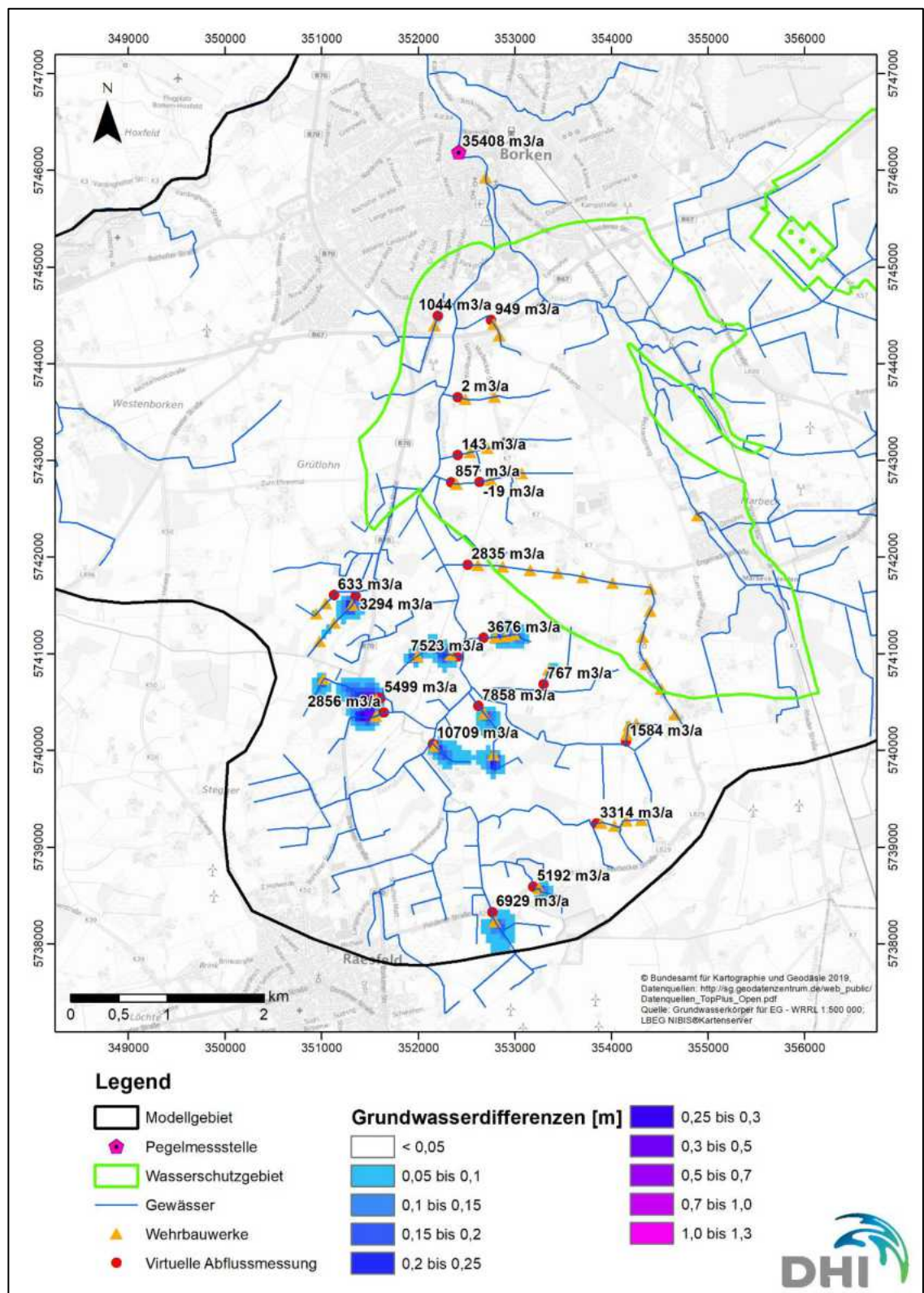


Abbildung 7-16: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode durch Maßnahme der statischen Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenzen im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

In Abbildung 7-17 sieht man, dass die Verdunstung sich auf das ganze Modellgebiet bezogen um 22.543 m³/Jahr erhöht, während durch die saisonal gesteuerten Wehrbauwerke 14.474 m³/Jahr mehr Grundwasser angereichert werden. Auch im Grundwasserspeicher sieht man somit die Verringerung des Rückhalteeffekts durch das Herablassen des Wehranstauhöhe auf 40 cm. In der Simulation der statischen Wehrbauwerke lag die Grundwasseranreicherung um etwa 2.000 m³/Jahr höher.

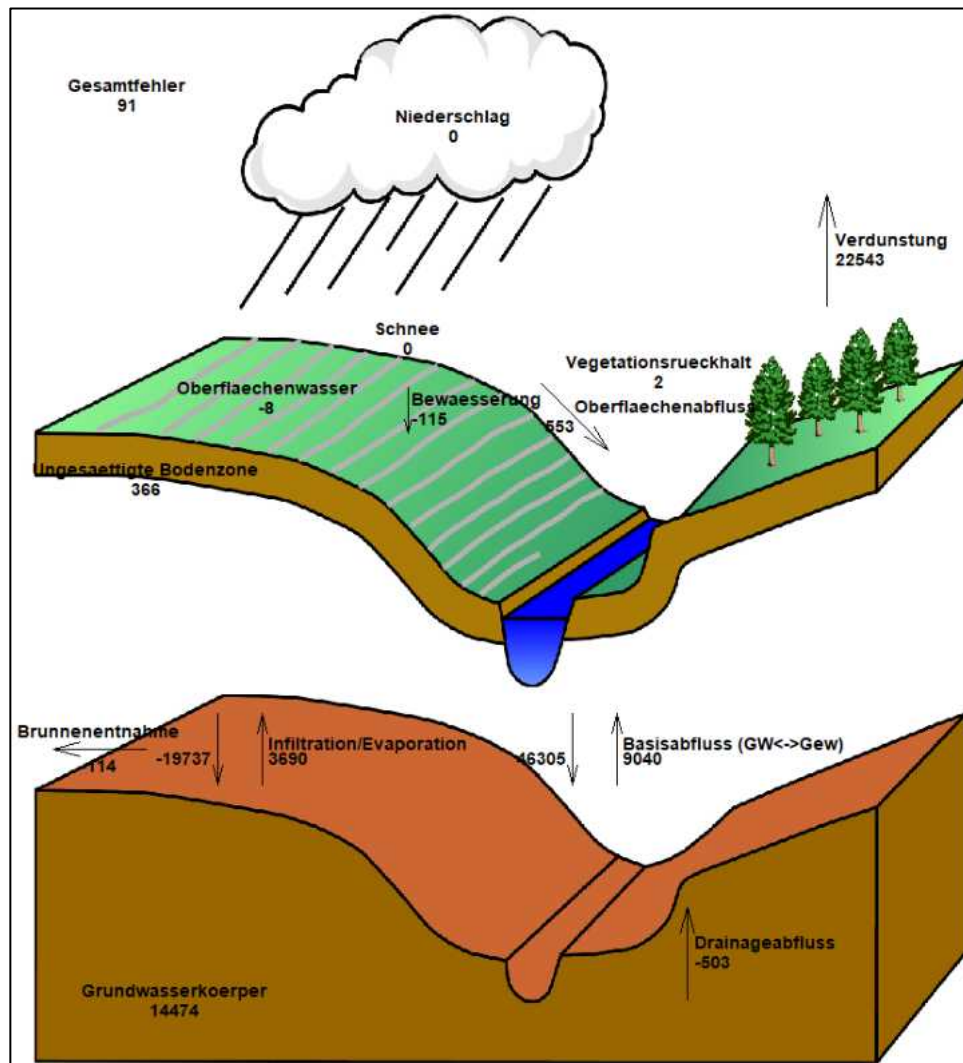


Abbildung 7-17: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.

Die monatliche Aufschlüsselung der Wasserbilanzgrößen in Abbildung 7-18 zeigt, dass der Basisabflussanteil im Mai, der durch das Herabsetzen der Wehranstauhöhe bedingt ist, mit jedem trockenen Jahr abnimmt. Dies bestätigt die Aussagen aus Kapitel 7.3.2, wonach die Grundwasserstände um die Wehrbauwerke so stark sinken, dass die Anbindung an das Gewässer verloren geht. Dadurch wird, wie bereits erörtert, an vielen Stellen mit fortschreitender Absenkung des Grundwasserspiegels lediglich der Direktabflussanteil zurückgehalten. Damit wird die Wirksamkeit der Wehrbauwerke verringert. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

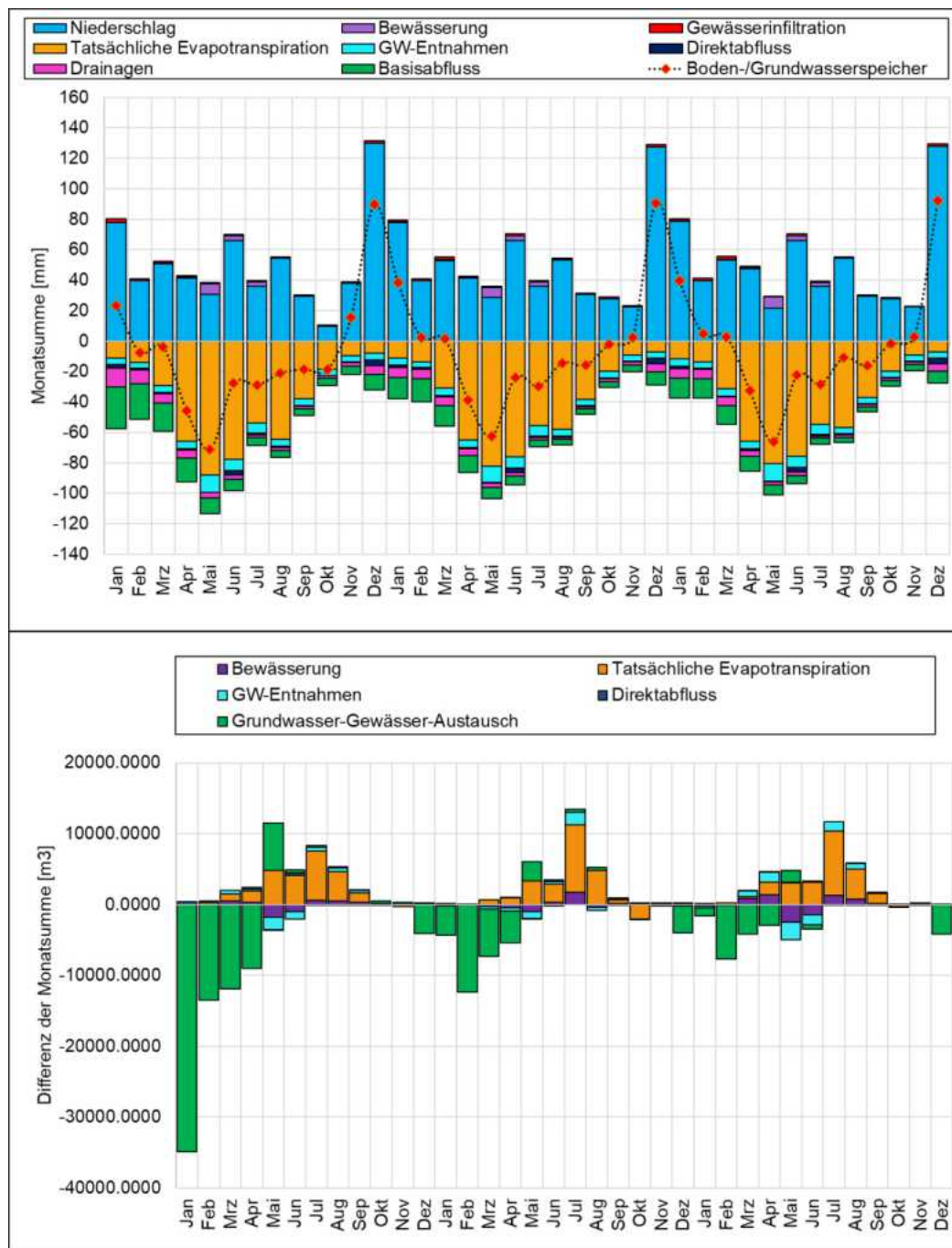


Abbildung 7-18: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm – Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre. Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Trocken“.

7.4.3 Nassjahr Simulation

Mit der Nassjahr-Simulation soll die Wirksamkeit der Maßnahmen unter klimatisch sehr feuchten Bedingungen beurteilt werden. Die Randbedingungen entsprechen denen, des Referenzzustandes Nass (siehe Kapitel 7.2).

In Abbildung 7-16 ist das räumliche Ergebnis der Simulation mit Grundwasser- und Abflussdifferenzen dargestellt. Am Pegel Stadt Borken zeigt sich eine Reduzierung des Abflusses um 51.824 m³/Jahr. Damit werden etwa 12 Tsd. m³/Jahr weniger Wasser im Jahr zurückgehalten als im Szenario der statischen Wehrbauwerke.

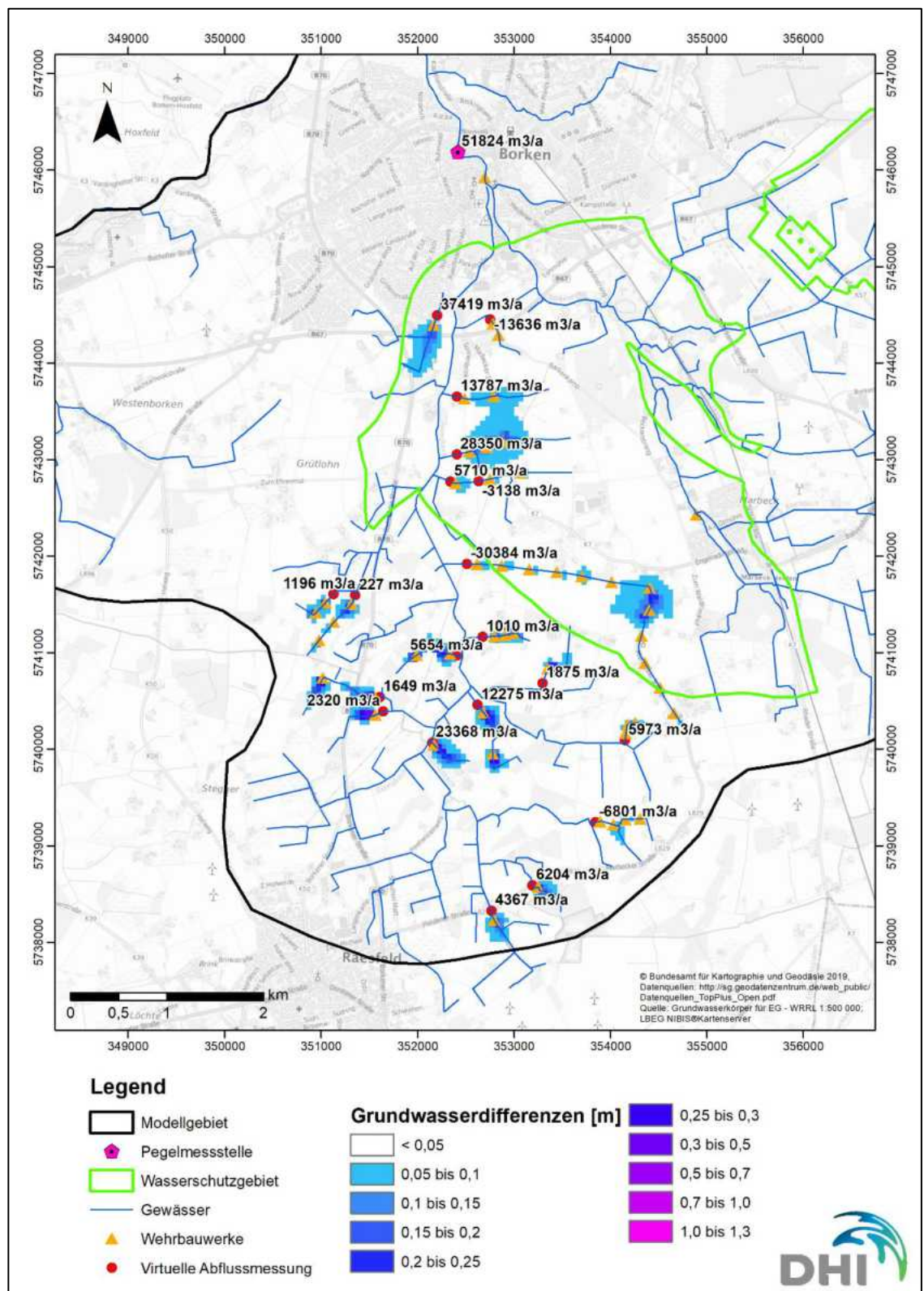


Abbildung 7-19: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

Bei Betrachtung der Wasserbilanz (siehe Abbildung 7-20) zeigt sich, dass der Grundwasserspeicher durch die Maßnahme um etwa 45 Tsd. m³/Jahr aufgefüllt wird. Damit wird durch Herabsetzen der Wehre im Mai 5 Tsd. m³/Jahr weniger Wasser im Grundwasser angereichert als bei vollem Anstau über das ganze Jahr mit den statischen Wehrbauwerken. Die Verdunstung nimmt um 13.559 m³/Jahr zu. Damit liegt die Verdunstungsdifferenz deutlich unter dem Nassszenario der statischen Bauwerke. Dieser Effekt wird durch die starke Entwässerung des Grundwassers im Mai erklärt, welcher in Abbildung 7-21 zu sehen ist.

Der Grundwasser-Gewässeraustausch wird um 85.054 m³/Jahr reduziert, während der Direktabfluss um etwa 31.000 m³/Jahr erhöht wird. Damit besteht auch hier die Hochwasserproblematik im Winter, welche bereits in 7.3.3 erörtert wurde. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

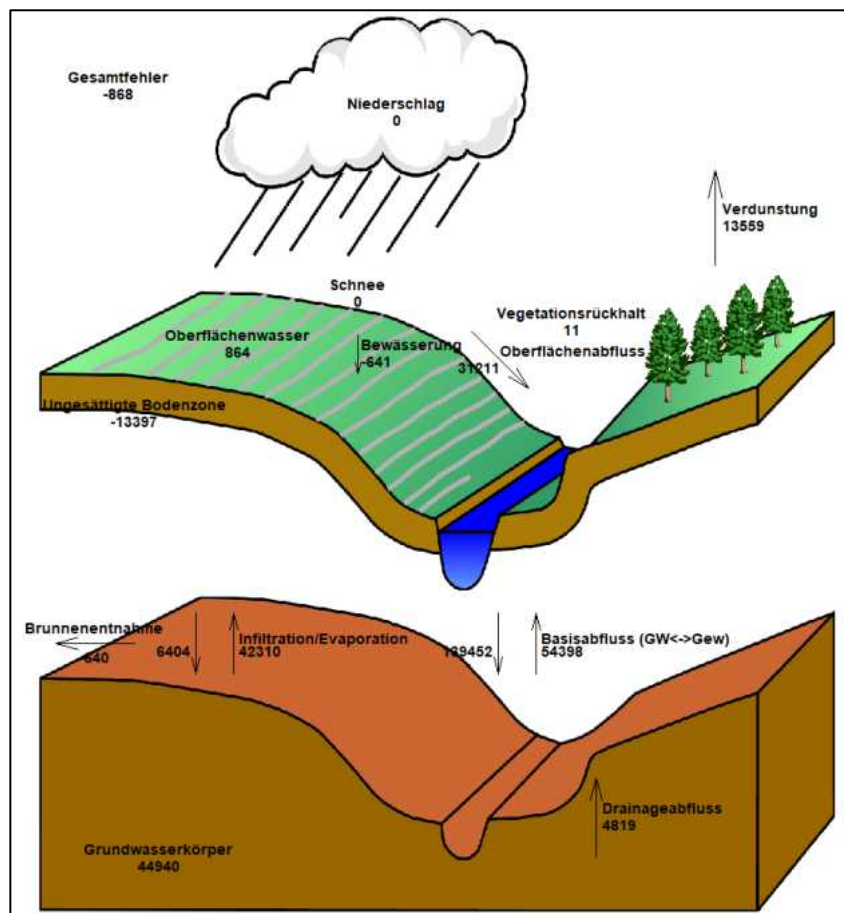


Abbildung 7-20: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40cm – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.

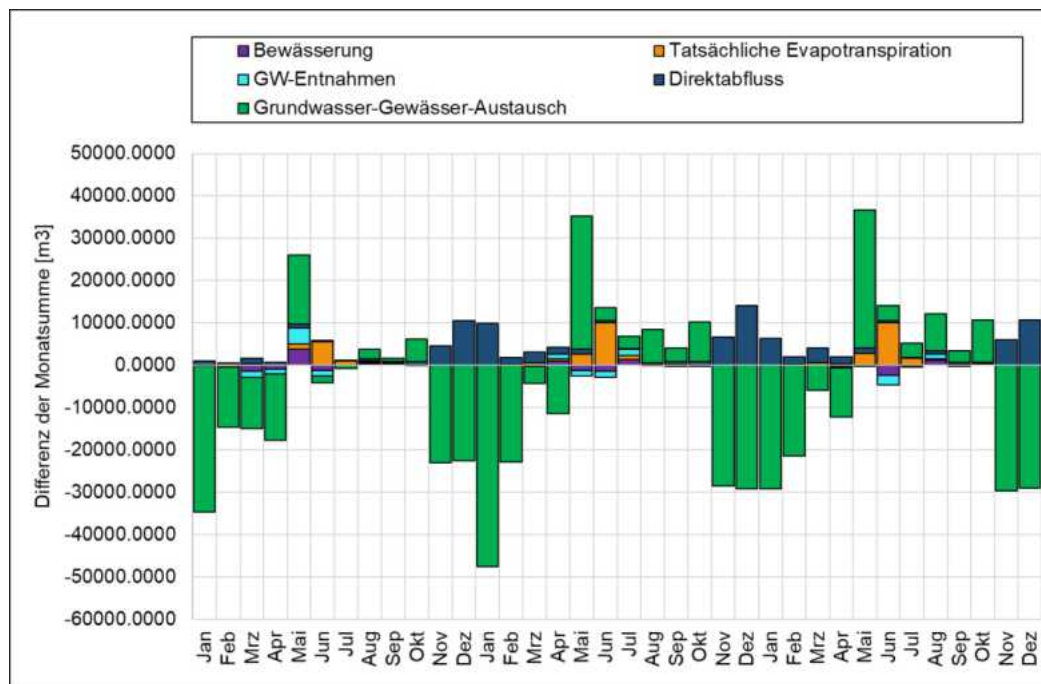


Abbildung 7-21: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke 40 cm - Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“.

7.5 Szenario - Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke - Sommer offen

In diesem Szenario werden weiterhin die Wehrbauwerke der letzten zwei Kapitel simuliert. Der Unterschied liegt in diesem Maßnahmenszenario darin, dass die Wehrbauwerke im Sommer als komplett herabgesetzt angesetzt werden und somit die Wehrbauwerke lediglich Wasser im Winter zurückhalten.

Wie im vorherigen Szenario wurden drei Simulationen aufgesetzt, um den Vergleich zu den historischen Klimajahren 2011-2022, aber auch zum Trocken- und Nassszenario aufzuführen. Die Randbedingungen neben der allgemeinen Maßnahmenumsetzung (Entnahmen, Bewässerungsansatz, Klimadaten) bleiben dabei im Vergleich zum vorherigen Szenario unverändert.

7.5.1 Vergleich Referenzlauf 2011-2022

Zuerst erfolgt der Vergleich mit dem Referenzlauf 2011-2022, entsprechend den vorherigen Kapiteln. Die Grundwasser- und Abflussdifferenzen sind in Abbildung 7-22

dargestellt. Am Pegel Stadt Borken liegt die Abflussdifferenz bei 10.856 m³/Jahr und damit etwa 5,5 Tsd. m³/Jahr unter der Maßnahme mit Anstau im Sommer auf 40 cm.

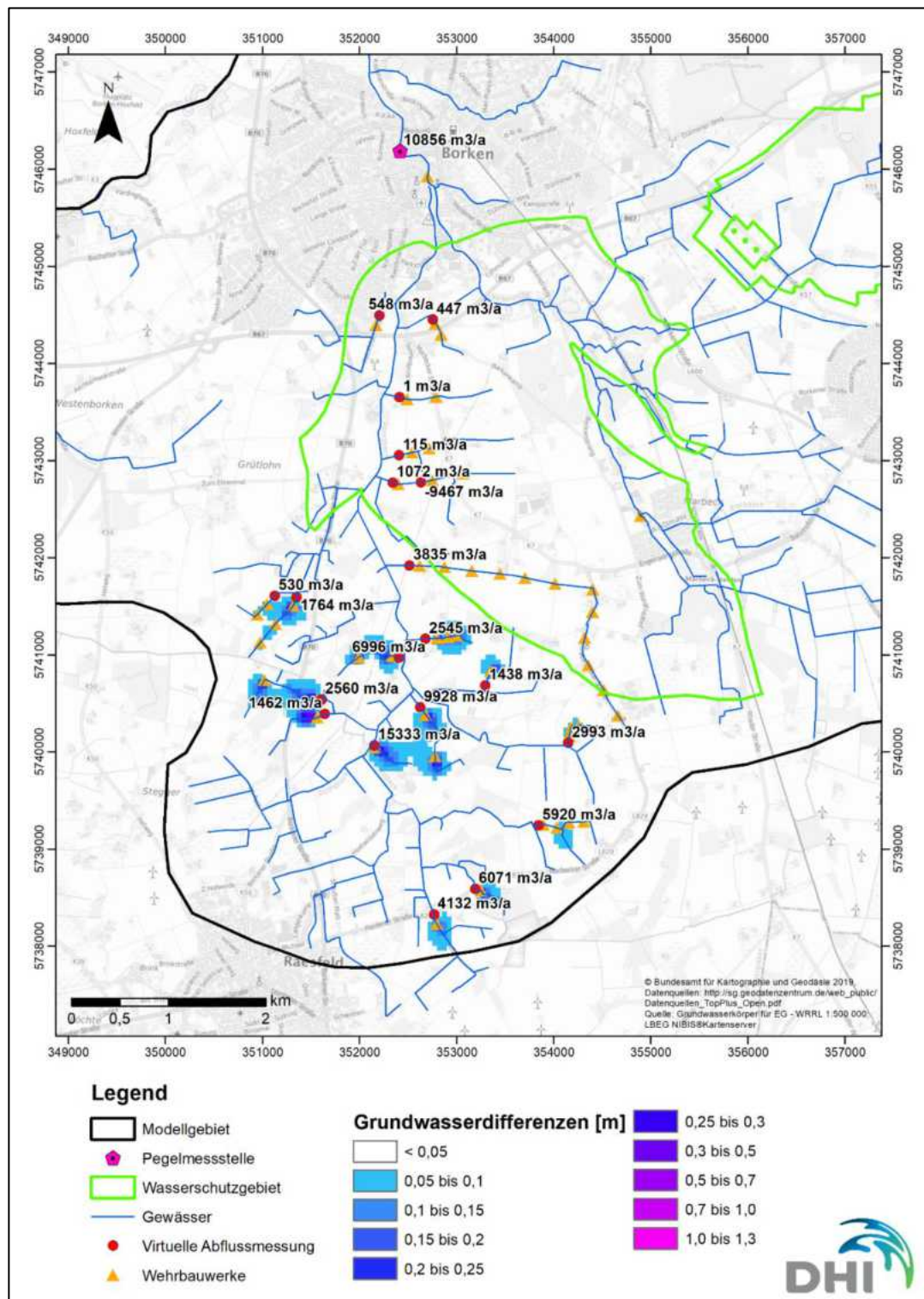


Abbildung 7-22: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der saisonal gesteuerten Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

In Abbildung 7-23 sieht man beim Vergleich zum Anstau auf 40 cm, dass durch die vollständige Öffnung der Wehre im Sommer der Basisabflussanteil um etwa 5.500 m³/Jahr steigt und dadurch etwa 4.000 m³/Jahr weniger verdunsten und gleichzeitig etwa 1.000 m³/Jahr weniger im Grundwasserspeicher vorhanden sind.

Wie in Abbildung 7-24 zu sehen ist, wird der im letzten Kapitel beschriebene Effekt der plötzlichen Entwässerung im Mai damit noch verstärkt. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

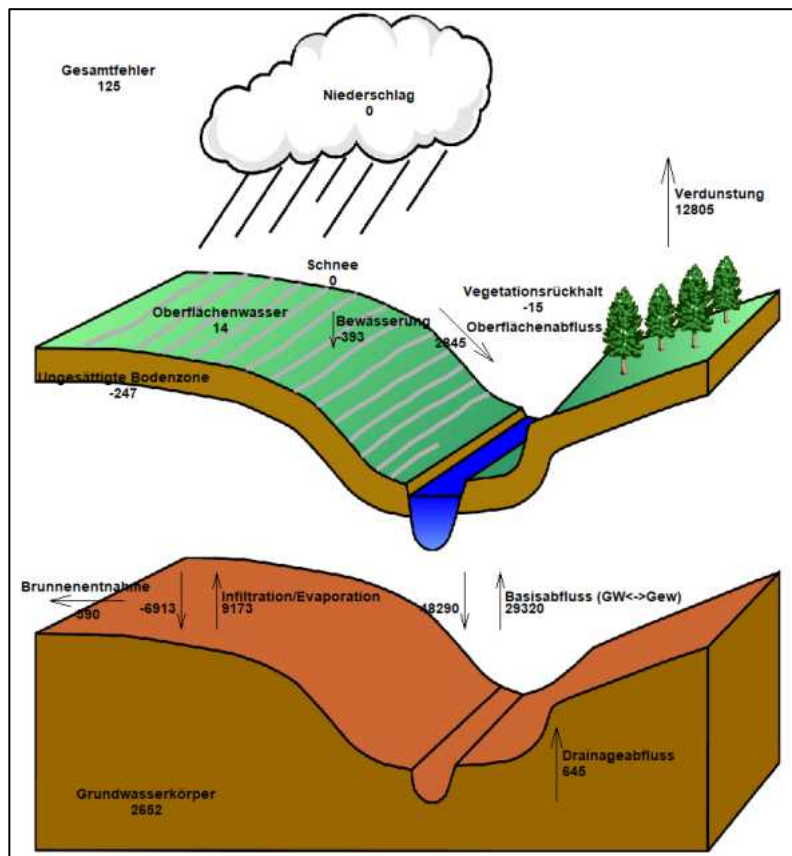


Abbildung 7-23: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.

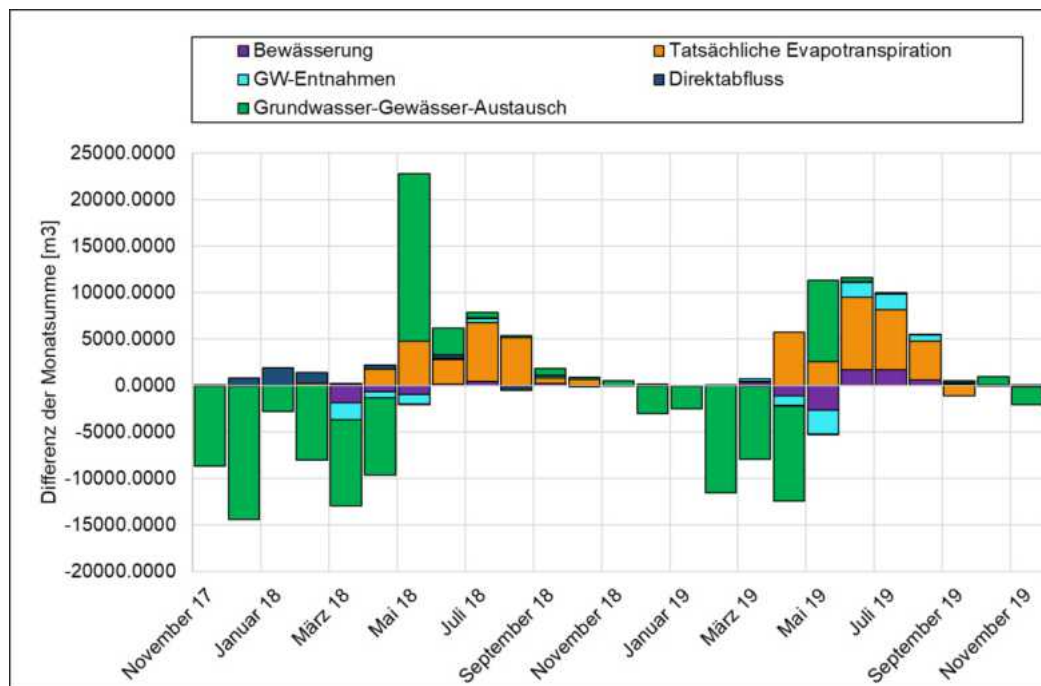


Abbildung 7-24: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen – Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand berechnet als jährliches Mittel für den Zeitraum 2011 bis 2022 in Kubikmeter.

7.5.2 Trockenjahr Simulation

Zur Bewertung der Effektivität der saisonal gesteuerten Wehre in extremen Trockenjahren wurde das dreijährige Szenario gemäß den Randbedingungen des Referenzzustands „Trocken“ simuliert (siehe Kapitel 7.1). Die Auswertungen wurden auf dieselbe Weise wie im vorherigen Kapitel durchgeführt.

Hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Vergleich der Maßnahme aus dem vorherigen Kapitel im Zeitraum 2011-2022. Die zurückgehaltene Abflussmenge am Pegel Stadt Borken beträgt 28.118 m³/Jahr und liegt damit etwa 13.000 m³/Jahr unter den Ergebnissen der Trockenjahr-Simulation mit statischen Wehrbauwerken und 7.200 m³/Jahr unter dem Szenario mit Anstau im Sommer auf 40 cm.

In Abbildung 7-26 sind die Differenzen der Bilanzgrößen grafisch dargestellt. Die Verdunstung erhöht sich im Vergleich zum Referenzzustand ohne Maßnahmen um 18.427 m³/Jahr, während der Grundwasserspeicher um 12.347 m³/Jahr erhöht wird. Diese Änderungen werden durch die Wehrbauwerke und daraus folgende Abnahme des Basisabflusses um 31.600 m³/Jahr verursacht. Der Rückhalteeffekt ist im Vergleich zum vorherigen Maßnahmenzenario damit geringer.

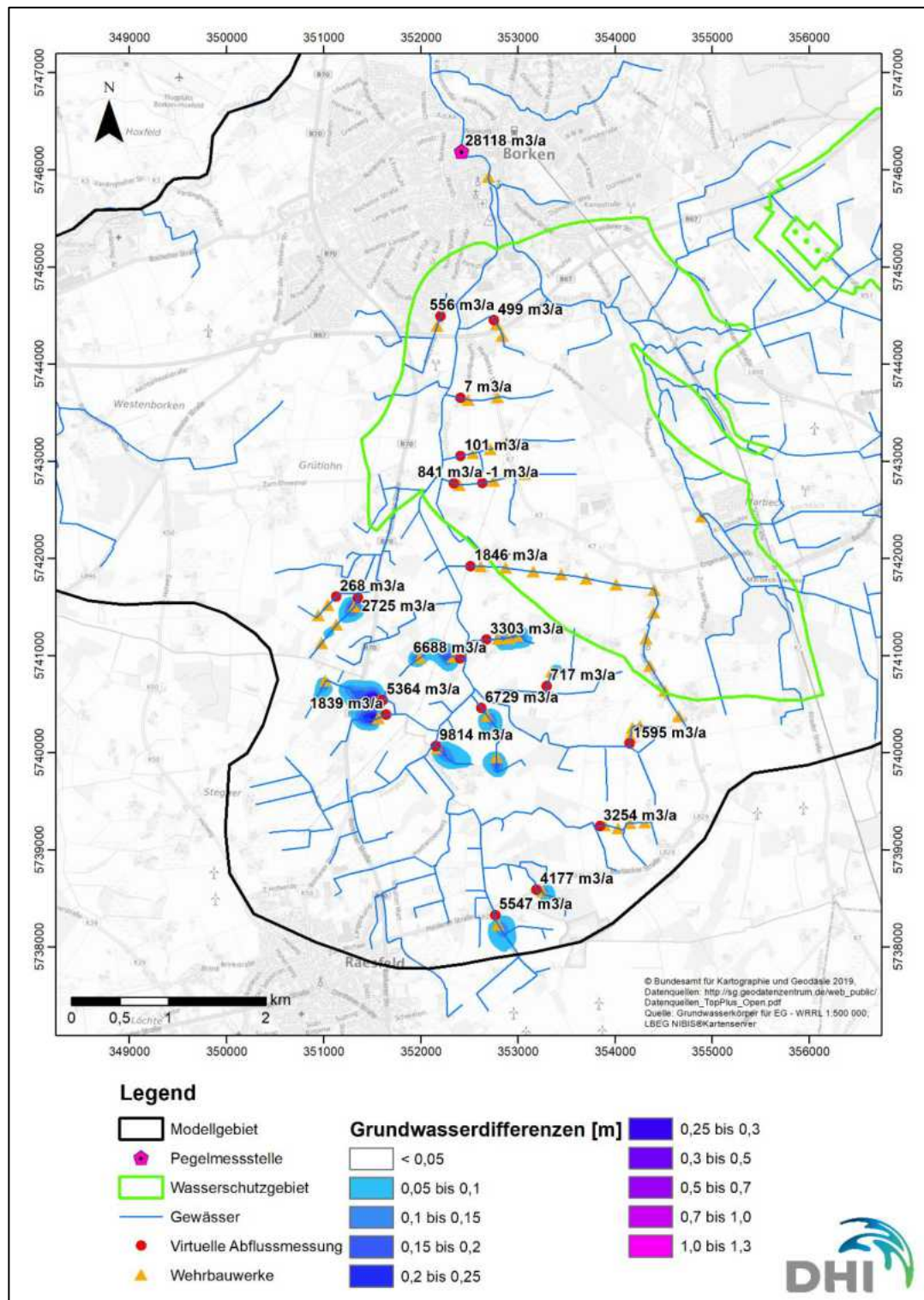


Abbildung 7-25: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

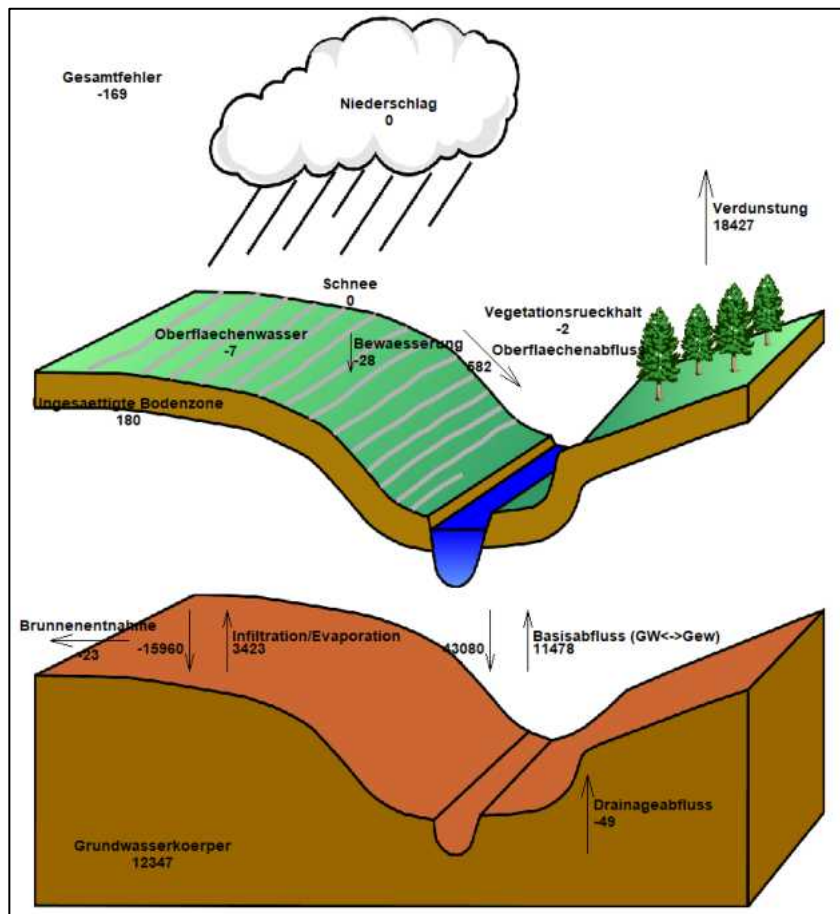


Abbildung 7-26: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand Trocken berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter

In der zeitlichen Betrachtung der Wasserbilanzgrößen in Abbildung 7-27 Abbildung 7-18 ist zu erkennen, dass der Basisabflussanteil im Mai sich, wie auch im vorherigen Maßnahmenzenario mit jedem trockenen Jahr verringert. Wie bereits erörtert, führt dies dazu, dass an vielen Stellen mit fortschreitender Absenkung des Grundwasserspiegels lediglich der Direktabflussanteil zurückgehalten wird. Somit verringert sich die Wirksamkeit der Wehrbauwerke mit zunehmender Austrocknung des Gebiets. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.



Abbildung 7-27:

Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen -
 Oben: Monatlichen Bilanzgrößen des Modellgebiets über die drei simulierten
 Trockenjahre. Unten: Änderungen der monatlichen Bilanzgrößen des
 Modellgebiets über die drei simulierten Trockenjahre im Vergleich zum
 Referenzzustand „Trocken“.

7.5.3 Nassjahr Simulation

Die Nassjahr-Simulation dient dazu, die Wirksamkeit der Maßnahmen unter sehr feuchten klimatischen Bedingungen zu beurteilen. Die Randbedingungen entsprechen denen des Referenzzustands „Nass“ (siehe Kapitel 7.2).

Abbildung 7-28 zeigt das räumliche Ergebnis der Simulation mit den Differenzen in Grundwasser und Abfluss. Am Pegel Stadt Borken ist eine Reduzierung des Abflusses um 45.743 m³/Jahr zu verzeichnen. Damit werden etwa 18.000 m³/Jahr weniger Wasser pro Jahr zurückgehalten als im Szenario der statischen Wehrbauwerke und rund 6.100 m³/Jahr weniger als im Szenario mit Sommeranstau auf 40 cm.

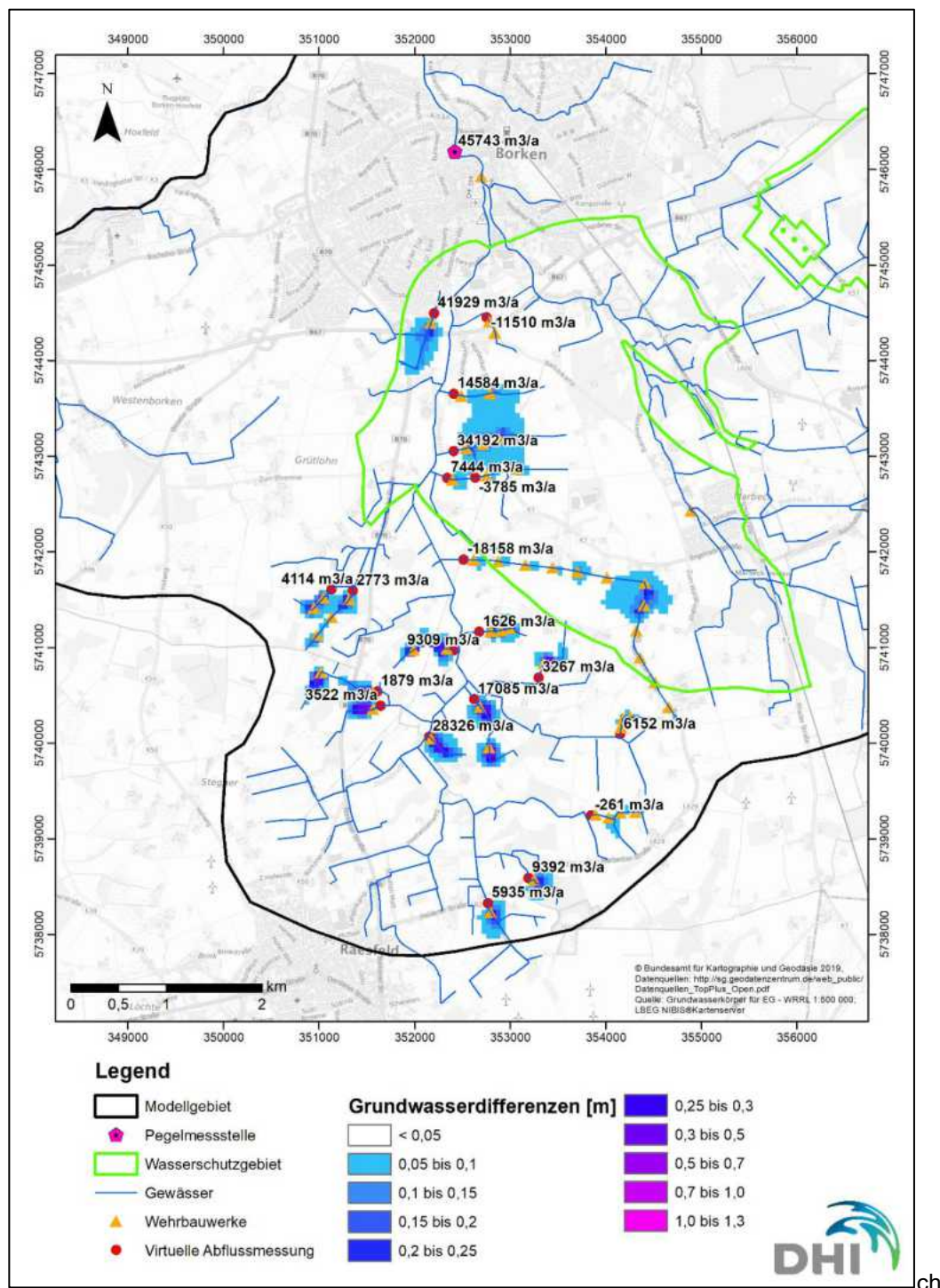


Abbildung 7-28: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre. Positive Werte deuten auf Abnahme des Abflusses bzw. Zunahme des Rückhalt hin.

Bei Betrachtung der Wasserbilanz (siehe Abbildung 7-29) zeigt sich, dass der Grundwasserspeicher durch die Maßnahme um 42.130 m³/Jahr aufgefüllt wird. Durch das komplette Herabsetzen der Wehre im Mai werden jedoch knapp 9.000 m³ weniger Wasser im Grundwasser angereichert als bei einem Vollanstau über das ganze Jahr (Szenario Statische Wehrbauwerke Nass). Die Verdunstung nimmt im Vergleich zum Referenzzustand ohne Maßnahmen um 11.486 m³/Jahr zu. Der Grundwasser-

Gewässeraustausch wird um etwa 75.000 m³/Jahr reduziert, während der Direktabfluss um 27.140 m³/Jahr erhöht wird.

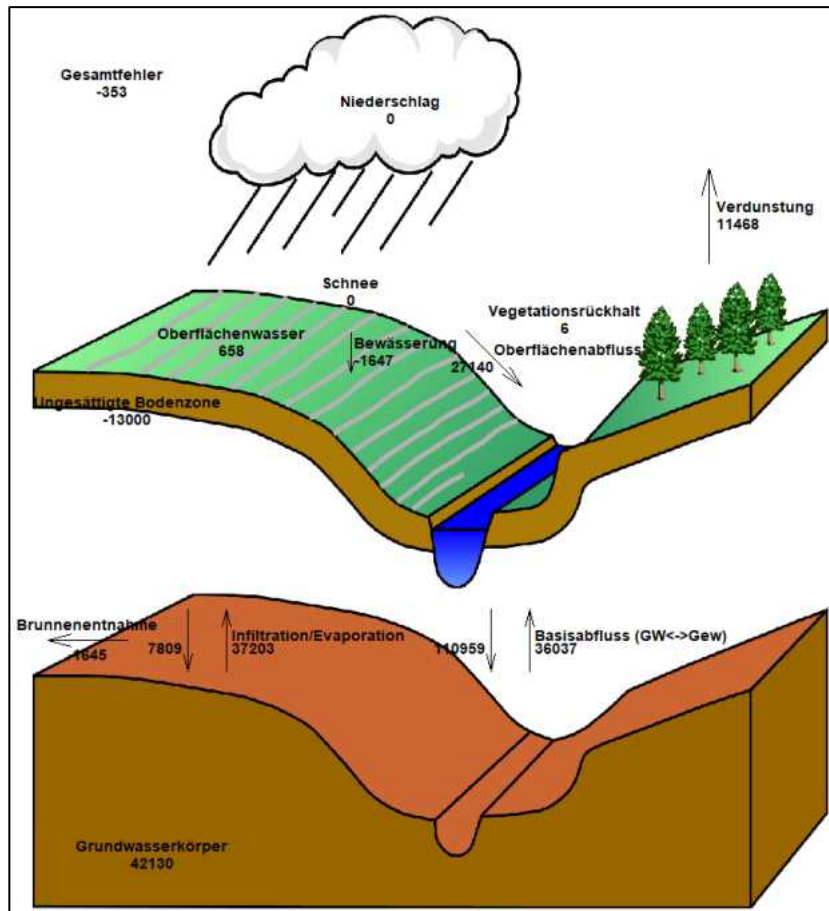


Abbildung 7-29: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen - Änderungen der Gesamtbilanz des Modellgebiets im Vergleich zum Referenzzustand „Nass“ berechnet als jährliches Mittel für die drei simulierten Jahre in Kubikmeter.

In Abbildung 7-30 ist zudem zu sehen, dass im Nassszenario durch die Öffnung der Wehre im Monat Mai bis zu 60.000 m³ Grundwasser in die Gewässer infiltrieren. Dadurch ist das Hochwasserrisiko durch die plötzliche Entwässerung hoch. Alle Szenarien mit simulierten Wehrbauwerken werden im Kapitel 7.6 nochmals verglichen.

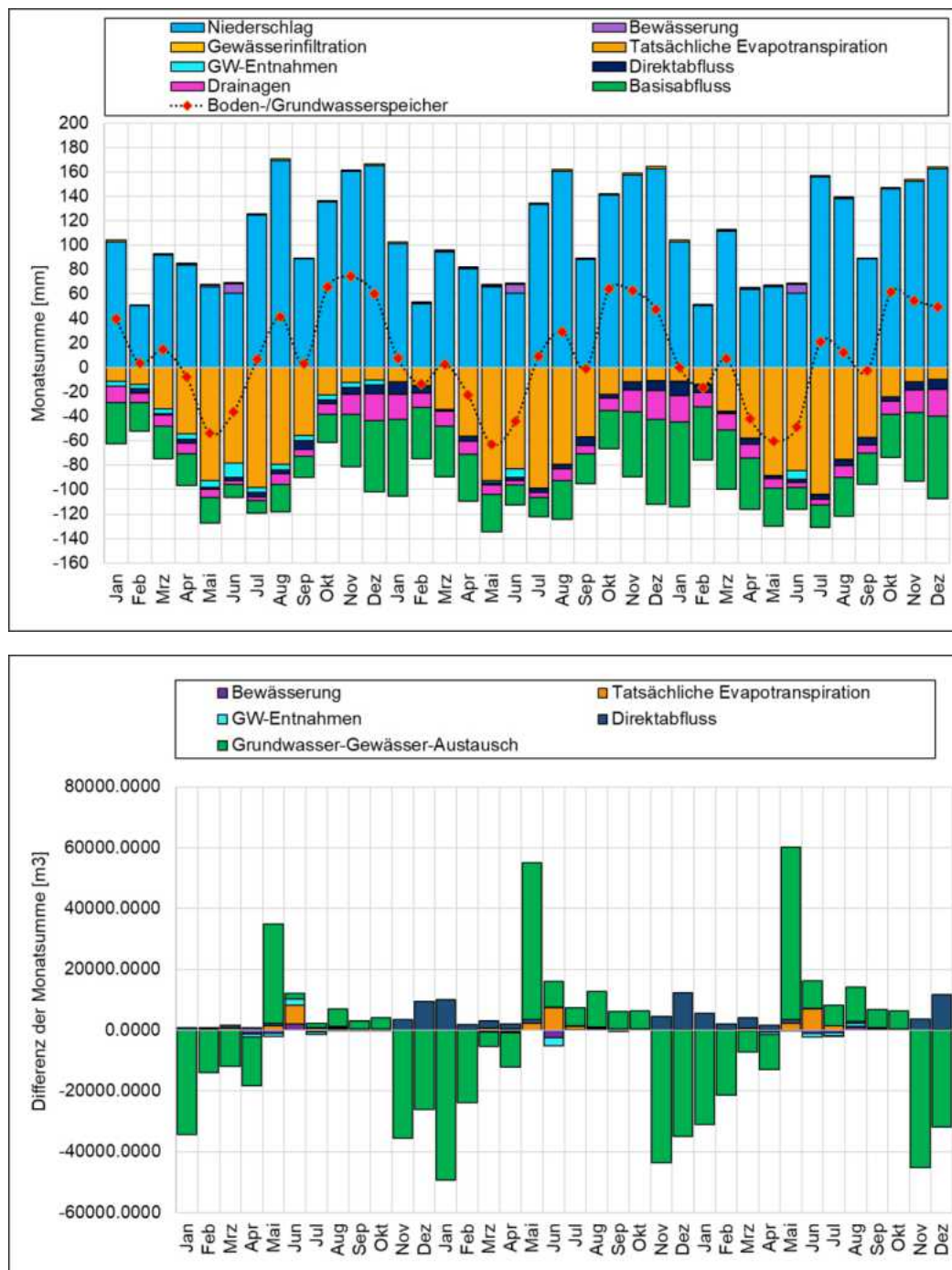


Abbildung 7-30: Maßnahme Saisonal gesteuerte Wehrbauwerke Sommer offen -
 Oben: Jahresgang der Wasserbilanz des ersten Jahres (Klimajahr 2023) der 3-jährigen Nassjahrsimulation.
 Unten: Differenz der Monatssummen mit Maßnahme im Vergleich zum Referenz ohne Maßnahmen in Kubikmetern.

7.6 Vergleich Wehrsteuerungsszenarien

Die Szenarien haben gezeigt, dass die Errichtung von Wehrbauwerken einen signifikanten Beitrag zum Wasserrückhalt im Modellgebiet leisten kann. Tabelle 7-2 fasst die Ergebnisse nochmals zusammen. Der größte Effekt auf die

Grundwasseranreicherung ist in den Nassjahren zu sehen. Dies liegt daran, dass die geplanten Wehre alle an Stellen liegen, welche stark vom Grundwasserstand abhängig sind. Da diese in nassen Jahren dauerhaft ans Grundwasser angebunden sind, wirken die Wehre entsprechend verstärkt als Barriere der Grundwasserentwässerung, während in den Trockenjahren die Grundwasserstände absinken und die Anbindung abbricht. In den Trockenjahren ist dennoch im Mittel ein stärkerer Effekt zu erkennen als in den Simulationen 2011 bis 2022. In den monatlichen Bilanz-Zeitreihen sieht man, dass die größten Effekte der Trockensimulationen allerdings im ersten Jahr erfolgen, in welchem noch hohe Grundwasserstände vorliegen. Daher ist grundlegend bei fortlaufendem Betrieb der Wehrbauwerke in Trockenjahren eine geringerer Wirkung als in durchschnittlichen Jahren zu erwarten. Durch den Rückhalt von Starkregenereignissen im Sommer spielen die Wehrbauwerke aber dennoch auch in Trockenjahren eine starke Rolle für den Wasserrückhalt und sind gleichzeitig zentral für den Hochwasserschutz.

Die Verdunstung erreicht im Trockenszenario mit statischen Wehren die maximale Zunahme im Vergleich zum Referenzzustand ohne Maßnahmen. Dabei ist nochmals zu betonen, dass die Effizienz der Wehrbauwerke durch Nutzung als Bewässerungswasser oder Zwischenspeicherung des Wassers signifikant erhöht wird. In diesem Fall kann man einen Großteil der Verdunstungsdifferenzen dem Dargebot hinzurechnen.

Generell ist eine Korrelation der abnehmenden Wirkung mit Heruntersetzen der Wehre im Sommer zu erkennen. Mit zunehmender Wirkung der Wehrbauwerke nimmt allerdings auch die Hochwassergefahr zu. Dies kann man auch am Nasssszenario mit statischen Wehrbauwerken festmachen, welches zum einen den höchsten Anteil an Grundwasseranreicherung aufweist, gleichzeitig aber auch zu einer starken Zunahme des Direktabflussanteils führt.

Damit die Wehrbauwerke optimal in Hinsicht auf Wasserrückhalt, ökologischem Mindestabfluss, Hochwasserschutz und Befahrbarkeit der landwirtschaftlichen Flächen funktionieren ist demnach eine adaptive Steuerungslogik bzw. aktive Steuerung nötig.

Abschließend lässt sich festhalten, dass durch den Bau von Wehrbauwerken an geeigneten Stellen signifikante Wassermengen als zusätzliches Dargebot bereitgestellt werden können. Durch eine effiziente Nutzung bzw. Speicherung des zurückgehaltenen Wassers und eine intelligente Steuerung kann die Wirksamkeit der Bauwerke erheblich gesteigert werden. Aus wirtschaftlicher Überlegung heraus sollten gezielt die Standorte ausgewählt werden, die das größte Potenzial aufweisen. Dabei müssen auch lokale Gegebenheiten und Effekte berücksichtigt werden, wie beispielsweise angrenzende Gräben, über die das zurückgehaltene Wasser potenziell abfließen könnte. Die simulierten Szenarien mit deren Auswertung können hier Hinweise geben, an welchen Stellen das Potenzial am größten ist, ohne dabei Anlieger zu gefährden.

Tabelle 7-2: Vergleich der Wehrsteuerungsszenarien: Differenzen der Wasserhaushaltskomponenten zum Referenzlauf in Kubikmeter. Dargestellt sind die Differenzen im Vergleich für das jeweilige Szenario von 2011-2022, das Trockenszenario (TS), und das Nassszenario (NS)

	Volleinstau dauerhaft (7.3)			Sommer 40cm / Winter Volleinstau (7.4)			Sommer offen / Winter Volleinstau (7.5)		
Wasserhaushaltskomponente	2011-2022	TS	NS	2011-2022	TS	NS	2011-2022	TS	NS
Abflussdifferenzen Pegel Stadt Borken [m³]	-24.015	-41.372	-63.854	-16.284	-35.408	-51.824	-10.856	-28.118	-45.743
Grundwasserspeicher [m³]	4.566	16.496	50.063	3.715	14.474	44.940	2.652	12.347	42.130
Aktuelle Verdunstung [m³]	21.042	25.549	21.955	16.989	22.543	13.559	12.805	18.427	11.468
Grundwasser- Gewässeraustausch [m³]	-30.074	-42.753	-105.549	-24.705	-37.265	-85.054	-18.970	-31.602	-74.922
Direktabfluss [m³]	3.540	712	39.477	3.035	553	31.211	2.845	582	27.140

7.7 Szenario – Grabenaufschüttung und Drainageverschluss

Im Folgenden wurde eine Grabenaufschüttung in großen Teilen des Modellgebiets und gleichzeitig der Drainageverschluss der Flächen im Nordwesten simuliert. Damit soll untersucht werden, wie sich der Wasserhaushalt im Gebiet durch ein weniger dichtes Grabennetzwerk ändern würde. In den folgenden Ergebniskarten sind die Teilabschnitte der Gräben farblich markiert, welche Teil der modellierten Aufschüttungsmaßnahme sind.

Wie in den vorherigen Szenarien wurden drei Simulationen aufgesetzt, um den Vergleich zu den historischen Klimajahren 2011-2022, aber auch zum Trocken- und Nassszenario aufzuführen. Die Randbedingungen neben der allgemeinen Maßnahmenumsetzung (Entnahmen, Bewässerungsansatz, Klimadaten) bleiben dabei im Vergleich zum vorherigen Szenario unverändert.

7.7.1 Vergleich Referenzlauf 2011-2022

Die Auswertung der Modellergebnisse erfolgt gemäß den vorherigen Kapiteln. Abbildung 7-31 stellt die Grundwasserdifferenzenkarte mit den lokalen Abflusssdifferenzen dar. Die Analyse zeigt ein deutliches Ergebnis. In den Aufschüttungsbereichen sind Grundwassererhöhungen von über einem Meter zu verzeichnen. Dies spiegelt sich auch in der Reduzierung des Abflusses am Pegel Stadt Borken wider. Hier zeigt sich ein erhöhter Gesamtrückhalt im Einzugsgebiet Döringbach und Borkener Aa von 915 Tsd. m³ im Jahr. Dieses Ergebnis verdeutlicht den Effekt der Entwässerungswirkung der Gräben und Drainagen im Gebiet.

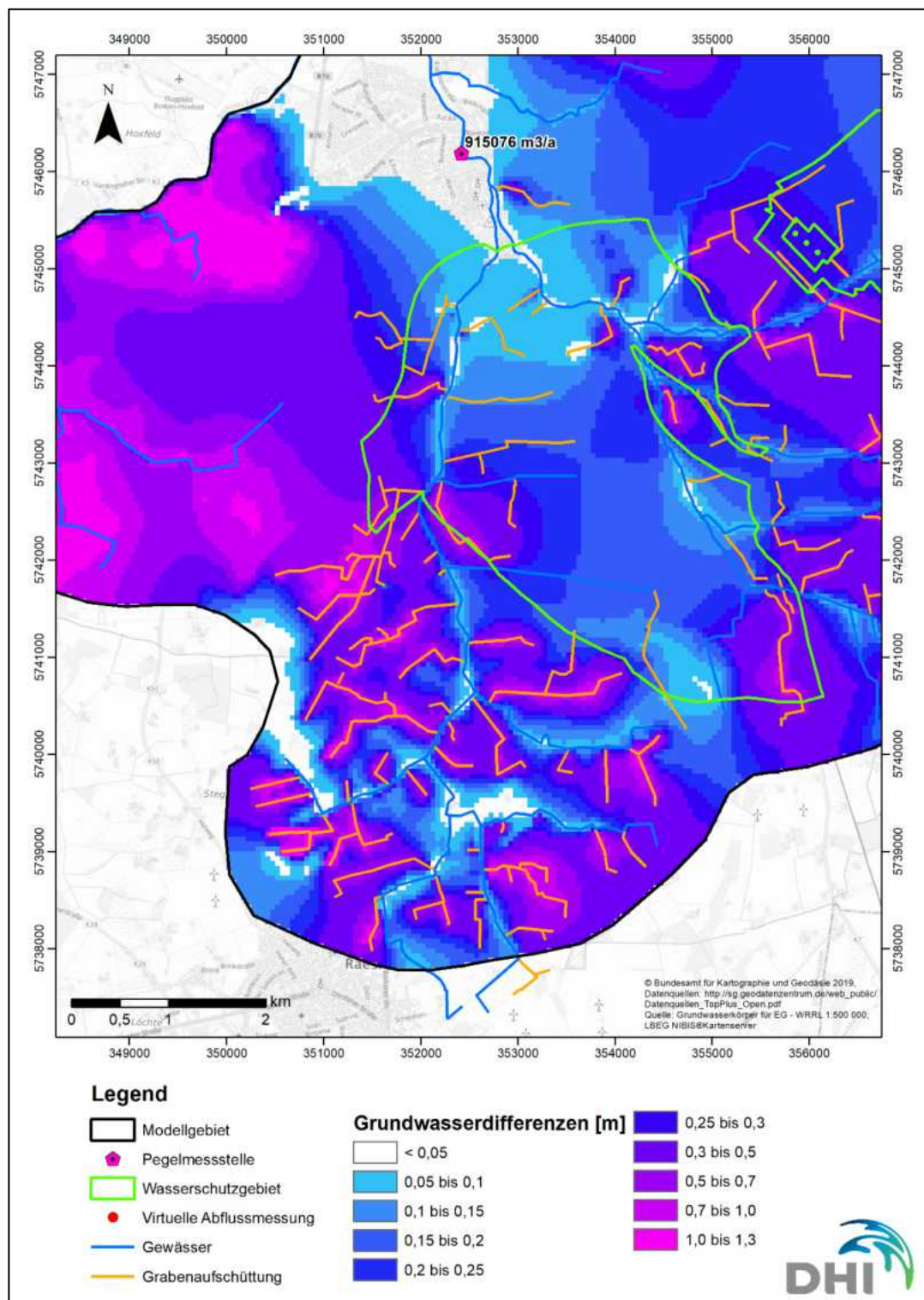


Abbildung 7-31: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.

7.7.2 Trockenjahr Simulation

Auch für die Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss wurde ein Trockenszenario simuliert, um den Effekt in Trockenperioden zu untersuchen. Die

Randbedingungen entsprechen denen, des Referenzzustandes Trockenjahr (siehe Kapitel 7.1). Das Ergebnis zeigt eine verstärkte Wirksamkeit der Maßnahme in Trockenjahren. Die zurückgehaltene Wassermenge im Gesamteinzugsgebiet des Döringbachs und der Borkener Aa übersteigt den vorherigen Wert um weitere 487 Tsd. m³ im Jahr.

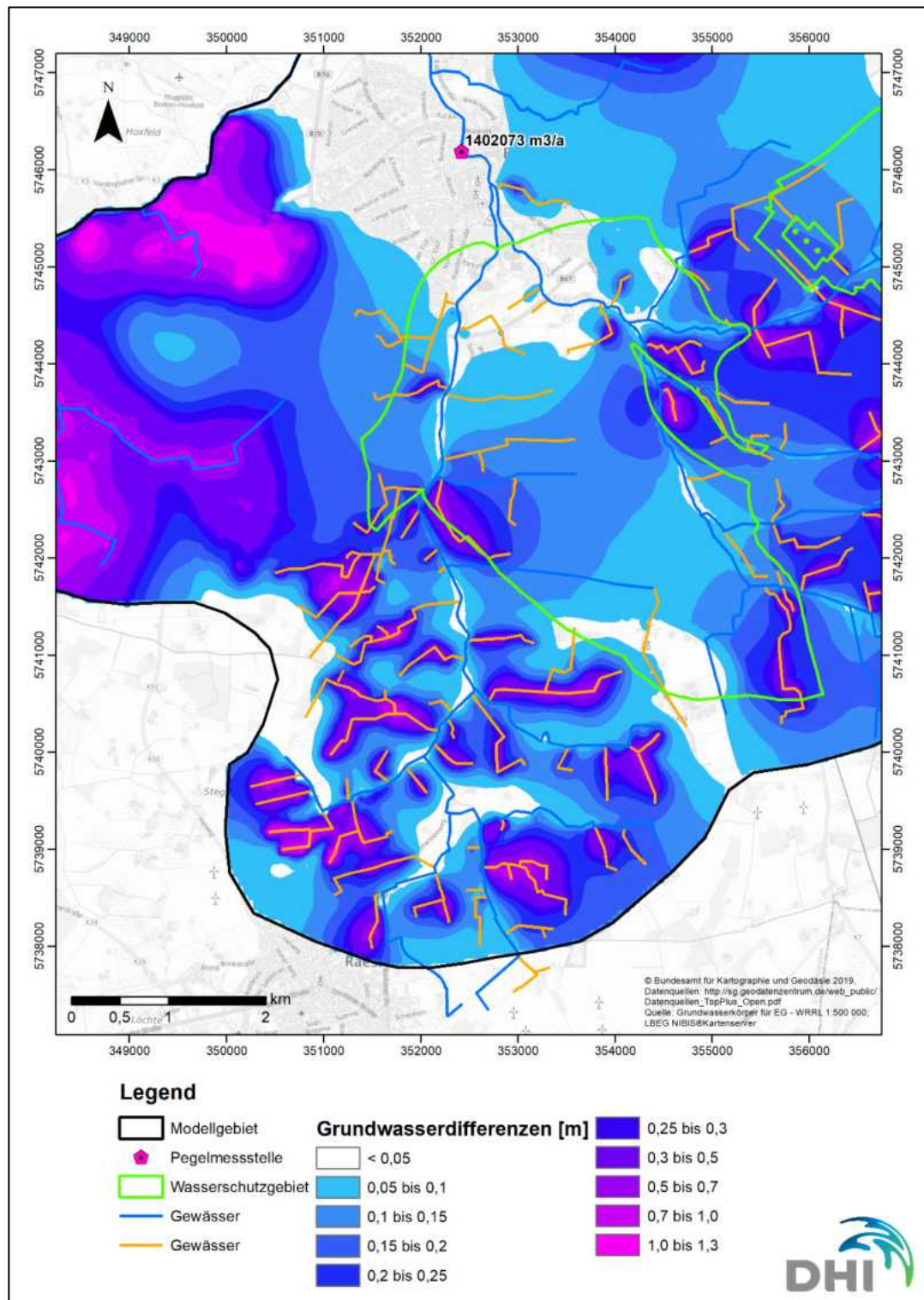


Abbildung 7-32:

Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Trockenperiode durch

Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Trockenjahr.

7.7.3 Nassjahr Simulation

Zudem wurde die Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss während einer 3-jährigen Nassperiode simuliert. Die Randbedingungen entsprechen denen, des Referenzzustandes Nassjahre (siehe Kapitel 7.2). Das Ergebnis zeigt, dass in mehrjährigen Nassjahren die Maßnahmen immer noch wirksam sind und durch die hohen

Niederschläge ein im Vergleich zum Referenzzustand zurückgehaltenes Volumen von 1,94 Millionen Kubikmeter im Jahr erreicht wird.

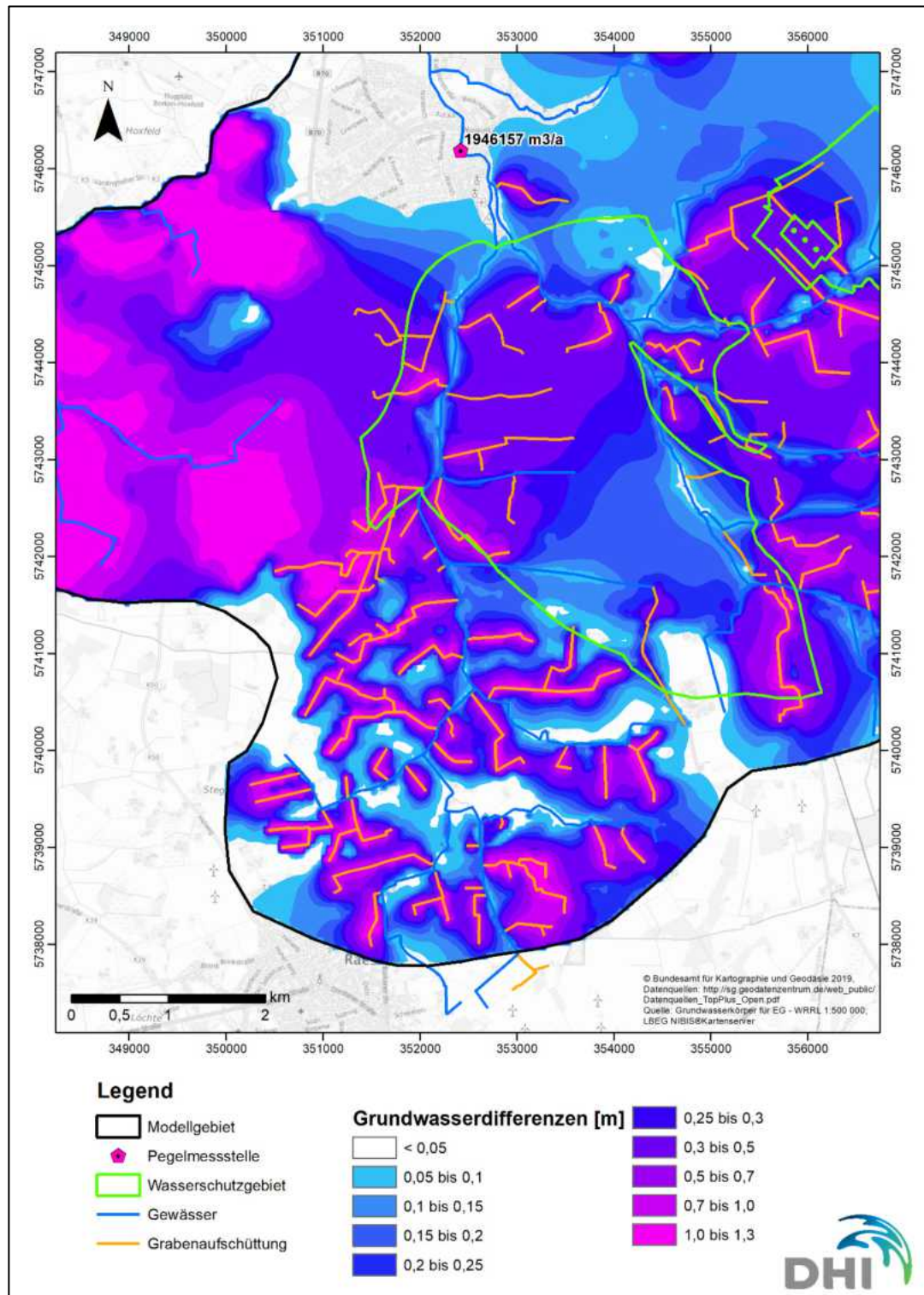


Abbildung 7-33: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der Grabenaufschüttung und Drainageverschluss mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre.

7.8 Szenario - Lokale Maßnahmen im Fellerhofgraben

Der nächste Schritt auf dem Weg zum Wasserrückhalt im Gebiet Borken ist ein Pilotversuch, welcher zur Erprobung der Maßnahme in der Realität angedacht ist. Dabei wurde im ersten Zuge vom Auftraggeber der Fellerhofgraben als potenzieller Standort für ein steuerbares Stauwehrbauwerk identifiziert.

Um vorab die Wirksamkeit der Maßnahme abzuschätzen, wurde ein Szenario mit dieser einzelnen Maßnahme gerechnet. Damit kann ausgeschlossen werden, dass andere Maßnahmen einen Einfluss ausüben.

7.8.1 Vergleich Referenzlauf 2011-2022

Die Grundwasserdifferenzkarte ist in Abbildung 7-35 zu sehen. Es ergibt sich durch das Wehr im Mittel ein jährlicher Wasserrückhalt von 810 m³. Das Gebiet stromaufwärts vom Fellerhofgraben ist durch hohe Flurabstände geprägt. Deshalb trägt auf der Höhe der Maßnahme im Sommer primär der Direktabfluss zum Gesamtabfluss des Fellerhofgrabens bei. Im Winter ist das Wehr an das Grundwasser angebunden und kann damit exfiltrierendes Grundwasser zurückhalten.

In Abbildung 7-34 ist zudem ergänzend ein Abflussvergleich zwischen Referenzzustand und Maßnahmenzenario direkt unterhalb der Maßnahme aufgeführt. Hier wird zusätzlich auch der Wasserstand stromaufwärts vor dem Wehr mit der Wehroberkante und -unterkante dargestellt. Daran kann der Füllgrad des Fellerhofgrabens vor dem Wehr abgeleitet werden. Man erkennt, dass das Wehr zu keinem Zeitpunkt der Simulationsperiode von 2011 bis 2022 überströmt wird. In den Sommermonaten läuft der Fellerhofgraben durch Absinken der Grundwasserstände und somit Verlust der hydraulischen Anbindung trocken. Der Vergleich der Abflüsse zeigt den Effekt des Stauwehres: die Winterabflüsse werden durch das Bauwerk zurückgehalten und die Abflussspitzen reduziert. Das im Winter zurückgehaltene Wasser gelangt daraufhin verzögert ins Grundwasser und exfiltriert unterstromig in das Gewässerbett des Fellerhofgrabens. Es kommt also zur Umströmung des Wehrbauwerkes. Man sieht, dass ein Teil des zurückgehaltenen Wassers der Winterabflüsse je nach klimatischen Bedingungen des Jahres bis in die Mitte des Jahres zurückgehalten werden kann.

Die Maßnahme des einzelnen Stauwehres an der gewählten Stelle erzielt im Mittelwert nur einen geringen Effekt. Saisonal betrachtet gewährleistet das Wehr allerdings eine Abflussverzögerung der Winterniederschläge bis in die Mitte des Jahres. Wenn dieses Wasser genutzt oder zwischengespeichert werden kann, bevor es das Wehr umströmt, trägt es der Deckung des Wasserbedarfs bei.

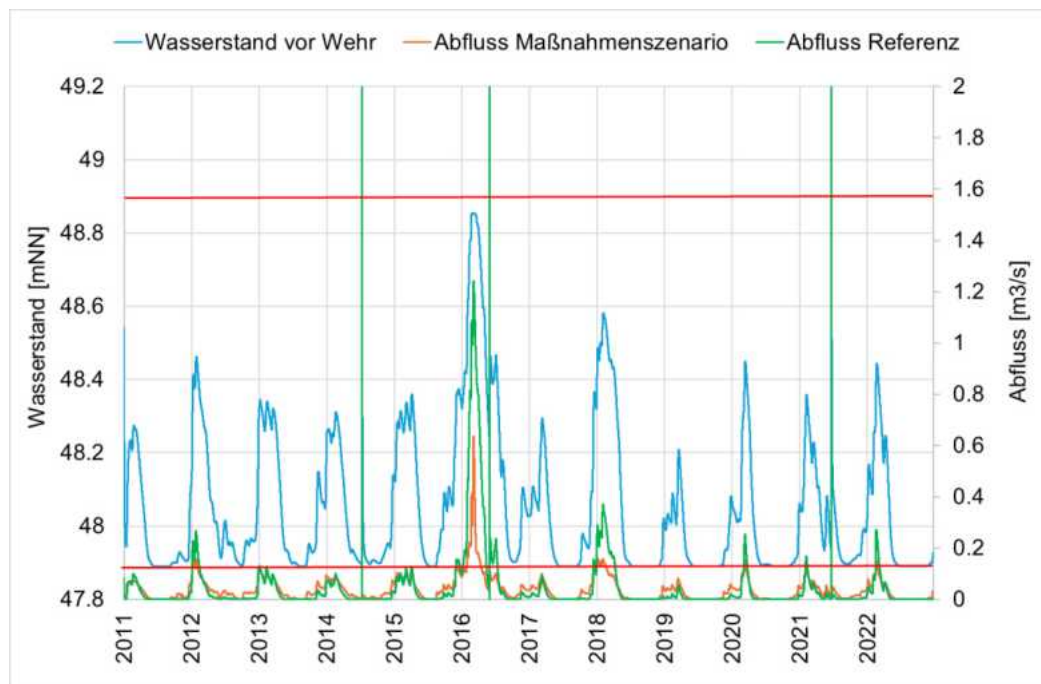


Abbildung 7-34: Wasserstand vor Wehr (Maßnahmenszenario) und Abflussvergleich der lokalen Maßnahme Fellerhofgraben mit Referenzzustand. Wehroberkante und Unterkante sind in Rot dargestellt.

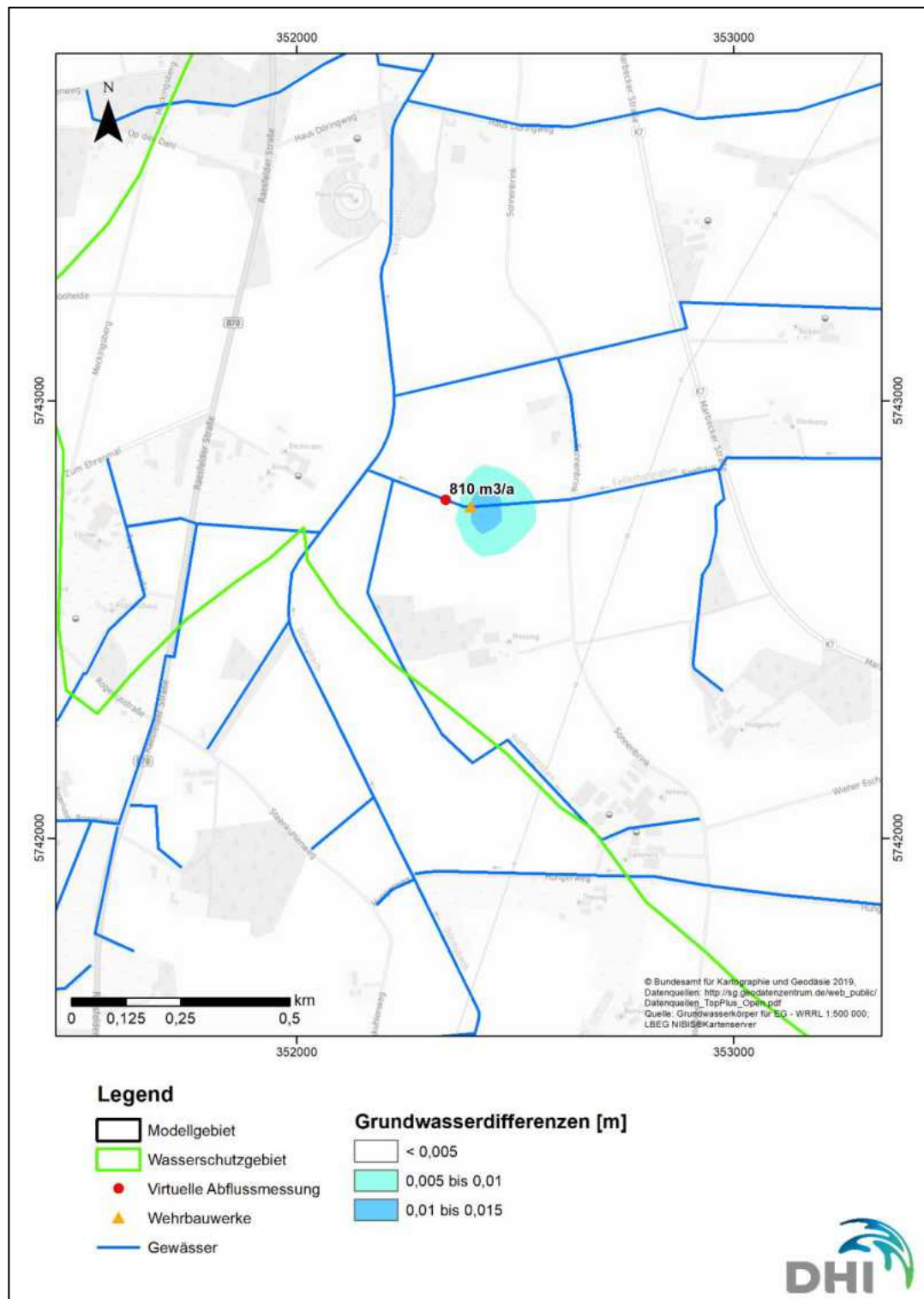


Abbildung 7-35: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme eines einzelnen Stauwehrs am Fellerhofgraben mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.

7.8.2 Nassszenario Simulation

Für die Auswertung der Wirksamkeit des einzelnen Stauwehrs wurde zusätzlich das Nassszenario simuliert. Damit ergibt sich eine Reduzierung des Abflusses um 13.789 m³ im Jahr. Da durch höhere Niederschläge die Grundwasserstände höher sind, kommt auch mehr Wasser am Wehr an. Damit lässt sich der verstärkte Effekt erklären.

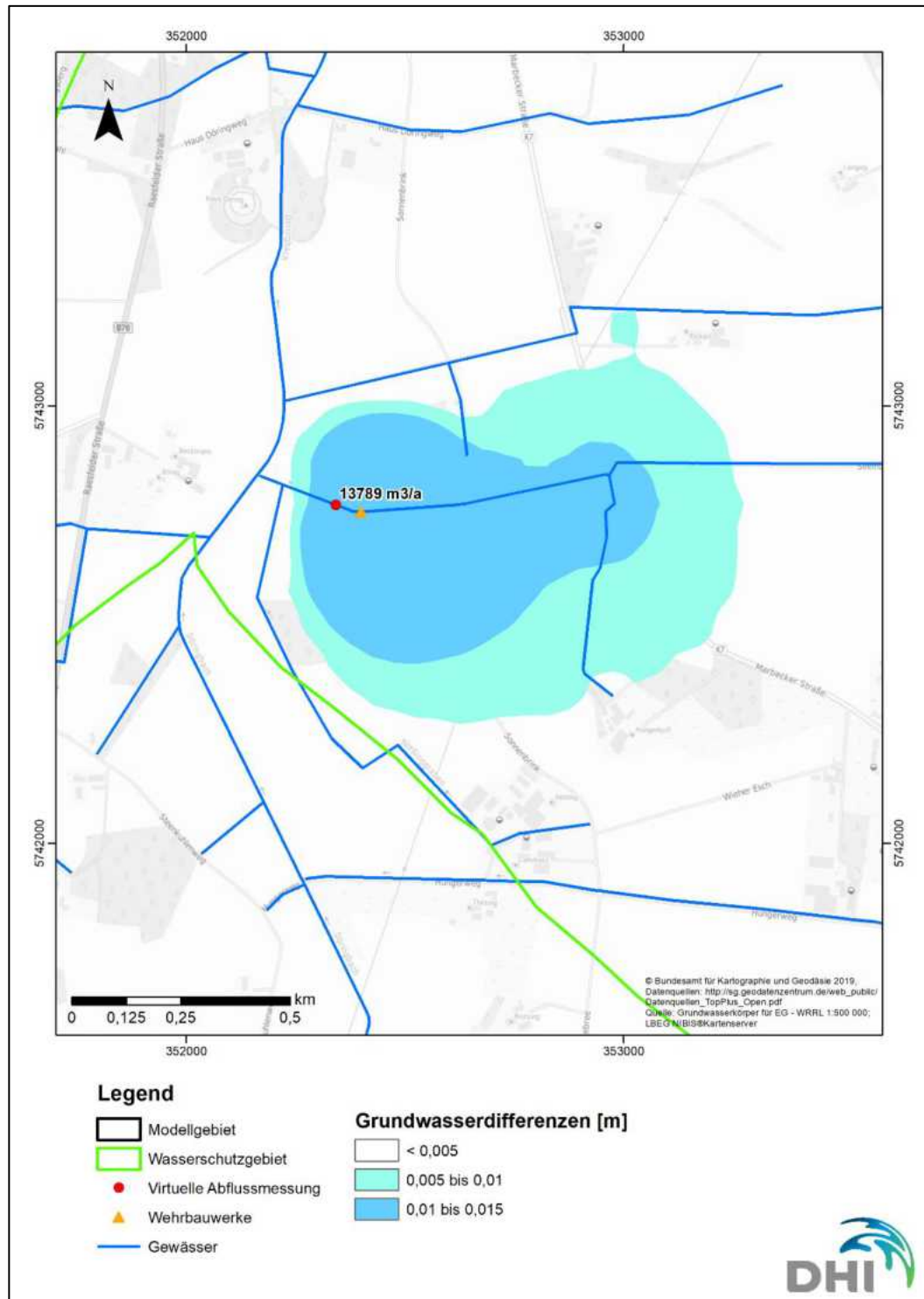


Abbildung 7-36: Grundwasserdifferenzen der 3-jährigen Nassperiode durch Maßnahme der saisonal-gesteuerten Wehrbauwerke mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario Nassjahre.

7.9 Szenario - Lokalen Maßnahmen im Hungerbach

In diesem Szenario wurde die lokale Maßnahme am Hungerbach getrennt für den Zeitraum 2011 bis 2022 simuliert. Damit kann wie auch im Szenario des Fellerhofgrabens ausgeschlossen werden, dass andere Maßnahmen ein Effekt auf den Hungerbach haben. Es wurden 12 Wehre modelltechnisch eingesetzt. Man sieht, dass lokal fast alle Wehrbauwerke zu einer minimalen Anhebung des Grundwassers oberstromig führen. Insgesamt tragen diese Bauwerke im Mittelwert zu einer Abflussreduzierung von 5341 m³/Jahr bei.

Der im Kapitel 7.8.1 beschriebene Effekt der Wehr-Umströmung tritt auch an dieser Stelle auf. Durch den Kaskadenaufbau der Wehre verbleibt allerdings das Wasser länger im Gebiet, da die umströmte Wassermenge teils wieder unterhalb am nächstes Wehr aufgefangen wird.

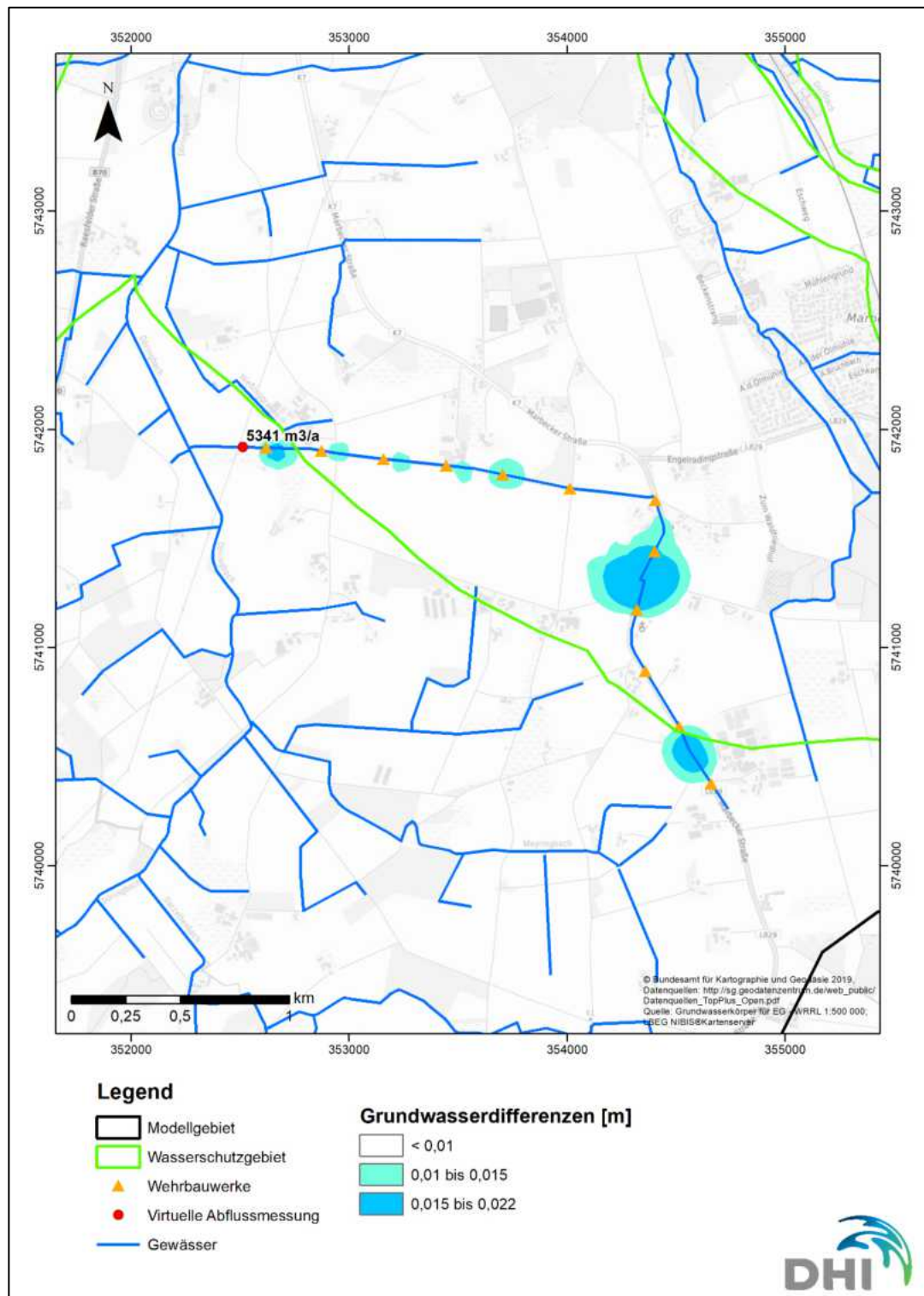


Abbildung 7-37: Grundwasserdifferenzen gemittelt 2011-2022 durch Maßnahme der Stauwehre am Hungerbachs mit Darstellung der Abflussdifferenz im Vergleich zum Referenzszenario IST-Zustand.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Wasserhaushaltsmodell wurde mit hoher Detailgenauigkeit für das Modellgebiet mit dem Modellsystem MIKE SHE erstellt. Das Modell bildet alle hydrologisch relevanten Prozesse dynamisch und hochaufgelöst ab, indem es ein integriertes Grundwassermodell, ein gekoppeltes Gewässermodell sowie Klima-, Vegetations-, Bewässerungs- und Bodendaten einbezieht. Dadurch werden unter anderem Grundwasser-Gewässer-Interaktionen sowie Prozesse der ungesättigten Zone in Verbindung mit Böden und Landnutzung detailliert dargestellt. Zudem werden wasserwirtschaftliche Aspekte wie Entnahmen und gewässerbezogene Bauwerke berücksichtigt.

Die Kalibrierung dieser Prozesse erfolgte sowohl auf Basis von Grundwasserständen als auch auf Abflussmessungen. Die erreichte Gütequalität der Kalibrierung kann als überdurchschnittlich gut eingestuft werden. Das Modell liefert somit belastbare Ergebnisse zum Wasserhaushalt im Modellgebiet und kann genutzt werden, um Maßnahmen zu planen.

Das Modell und die daraus geschlossenen Wasserbilanzen zeigen, dass das Gebiet durch einen hohen Basisabflussanteil geprägt ist. Obwohl die klimatischen Wasserbilanz grundsätzlich aufzeigt, dass genug Niederschläge das Gebiet speisen, wird ein Großteil dieser durch das dichte Graben-/Gewässernetz abgeführt. Die zahlreichen Szenarien bestätigen diesen Effekt.

Ein Teil des Basisabflusses kann durch flächenhafte und strategisch platzierte Wehrbauwerke zurückgehalten werden. Dabei muss flächendeckend geplant werden, um Verluste durch angrenzende Entwässerungssysteme zu vermeiden. Gleichzeitig kann die Wirksamkeit der Maßnahme durch Nutzung oder Speicherung des zurückgehaltenen Wassers signifikant erhöht werden. Zukünftige Analysen zur Hochwassergefährdung dieser Bauwerke sind zudem erforderlich. Generell wird empfohlen die Wehrbauwerke durch eine intelligente Steuerung zu ergänzen, wodurch Wasserrückhalt, der Erhalt des ökologischen Mindestabflusses, Hochwasserschutz und Befahrbarkeit der landwirtschaftlichen Flächen vereint werden kann. Insbesondere in Bereichen mit geringen Flurabständen und hohem Durchfluss stellen intelligent gesteuerte Wehrbauwerke eine Lösung dar, auch um Konflikte mit Anliegern zu vermeiden.

Die bereits vom AG geplanten Drainagesteuerungen können zukünftig ebenfalls in das Modell integriert werden. Damit können lokale Effekte und gesamtheitliche Maßnahmen simuliert und geplant werden.

Darüber hinaus wird empfohlen, zusätzliche Maßnahmen in Form von Kleinspeichern und Rückhaltebecken mit Hilfe des Modells zu prüfen. Diese könnten sowohl zur Regulierung des Wasserhaushalts als auch zum Hochwasserschutz beitragen. Damit können insbesondere die Wassermengen, welche im Süden durch das dichte Grabennetzwerk aus dem Grundwasser in die Bäche gelangen, im Gebiet an gegebenenfalls anderen Stellen erhalten werden. Auch Uferfiltrat, Oberflächenwassernutzung und Erdfolienbecken stellen Alternativen dar, welche in Erwägung gezogen werden sollten.

Andere Anwendungsbereiche des Modells, welche zukünftig denkbar wären sind im Folgenden exemplarisch aufgeführt:

- Überprüfungswerkzeug für neue Wasserrechtsanträge. Hier wäre denkbar, in das Modell entweder manuell oder automatisiert neue Brunnen zu integrieren. Anschließend können die Ergebnisse zeigen, dass das Wasserrecht keine negativen Einflüsse verursacht, oder weitere gutachterliche Tätigkeiten nötig wären.

- Einsatz in Planung von Moorvernässungsprojekten. MIKE SHE wird bereits in anderen Regionen in mehreren Moorvernässungsprojekten für Planungen eingesetzt. Diese wäre auch für den Kreis Borken möglich.
- Wie im Bericht erwähnt, ist im Modell ein Bewässerungsmodul mit integriert. D.h. man könnte das hier vorliegende Modell für die Berechnung des Bewässerungsbedarfs einsetzen.
- Auch der Einsatz für die Berechnung von Überschwemmungsgebieten wäre möglich. Auch könnten Maßnahmen für den Hochwasserschutz analysiert und quantifiziert werden, z.B. gesteuerte Wehre, Retentionsmaßnahmen oder andere Maßnahmen für den Hochwasserschutz.
- Durch das integrierte 1D-Gewässermodell können auch ökologische Mindestabflüsse ermittelt werden.
- Zudem ist eine Integration von Satellitendaten für den Echtzeitbetrieb möglich. Dabei können aktuelle Vegetationsdaten als Eingangsgröße in das Modell einfließen und die Bodenfeuchte zur Validierung des Modells genutzt werden.
- Wie in der Auswertung in Kapitel 6 erörtert, kann das Modell auch als Speicherbewirtschaftungstool verwendet werden. D.h. das Überprüfen des Ist-Zustandes sowie die Prognose, wie sich der Grundwasserspeicher unter bestimmten Annahmen entwickeln könnte.

Die Modellergebnisse könnten auch über eine Online-Plattform einem größeren Publikum zugänglich gemacht werden. Dadurch könnte sich die Akzeptanz von geplanten Maßnahmen erhöhen und insgesamt die Transparenz bezüglich der Wasserbewirtschaftung erhöht werden.

Übertragbar sind die oben erwähnten Anwendungsbereiche auch für andere Kreise oder Regionen. Das heißt in Regionen mit ähnlichen Fragestellungen können diese Prinzipien und Arbeitsabläufe eins zu eins übertragen werden. Benötigt wird dafür ein kalibriertes Modell für das jeweilige Betrachtungsgebiet. Anschließend kann direkt auf den hier erarbeiteten Herangehensweisen aufgebaut werden, z.B. eine Speicherbewirtschaftung.

9 Literaturverzeichnis

Abbott, M.B.; Bathurst, J.C.; Cunge, J.A.; O'Connell, P.E.; Rasmussen, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 87 (1–2): 45–59.

Ertl, G., Bug, J., Elbracht, D. J., Engel, N., & Herrmann, F. (2019). *Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18*. doi:10.48476/GEOBER_36_2019

Herrmann, F.; Wendland, F. (2021): Kooperationsprojekt GROWA + NRW 2021 – Modellierung des Wasserhaushalts in Nordrhein-Westfalen mit mGROWA, LANUV-Fachbericht 110.

Kristensen, K., & Jensen, S. (1975). A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Nordic Hydrology* 6, 170-188.

Merz & National Centre for Groundwater Research and Training, S. K. (Juni 2012). *Australian Groundwater Guidelines*. Waterlines Report Series No. 82.

Pöhler, H. C.-M. (2007). Abschlussbericht: KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie.

Schapp, M., Leij, F., & van Genuchten, M. (2001). ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, Band 251(3), 163-176.

Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Traidl, R. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. KA5. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten.

