



Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodellierung für ein Teilgebiet des Hessischen Rieds

Aufbau, Kalibrierung und Prognoserechnungen

Projekt-Nr.: **123370**

Bericht-Nr.: **01**

Erstellt im Auftrag von:
**Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft u. Verbraucherschutz
Mainzer Straße 80
65189 Wiesbaden**

Dr.-Ing. Klaus Piroth, Dr.-Ing. Bettina Starke,
Dr. Christina Haberer

2020-09-30

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1	ZUSAMMENFASSUNG.....6
2	VERANLASSUNG UND ZIEL7
3	UNTERLAGEN8
4	GRUNDLAGEN9
4.1	Beschreibung des Untersuchungsgebietes.....9
4.2	Überblick Geologie und Hydrogeologie.....10
5	ENTWICKLUNG DES HYDROGEOLOGISCHEN STANDORTMODELLS11
5.1	Datengrundlage11
5.2	Untersuchungsgebiet und Modellraum13
5.2.1	Horizontale Modellabgrenzung13
5.2.2	Vertikale Abgrenzung und Strukturierung des Modellraumes.....14
5.3	Hydrogeologische Parameter.....16
5.4	Grundwasserhydraulik18
5.4.1	Grundwasserströmung.....18
5.4.2	Entwicklung der Grundwasserstände.....18
5.4.3	Dikegulac-Konzentrationen19
5.5	Randbedingungen.....20
5.5.1	Oberflächengewässer20
5.5.2	Grundwasserentnahmen.....21
5.5.3	Grundwasserneubildung22
5.5.4	Modellränder24
6	NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL24
6.1	Modellaufbau24
6.1.1	Eingesetzte Software und Modellnetz.....24
6.1.2	Modellrandbedingungen25
6.2	Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells.....26
7	STOFFTRANSPORTMODELL29
7.1	Modellaufbau und Randbedingungen29
7.2	Berechnung der historischen Stoffausbreitung33
7.3	Bewertung der historischen Stoffausbreitung37
8	PROGNOSE DER ZUKÜNFTIGEN STOFFAUSBREITUNG39
8.1	Modellaufbau und Randbedingungen39
8.2	Prognose der zukünftigen Dikegulac-Ausbreitung.....39

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 4.1 Ausschnitt aus der Geologische Karte von Hessen 1 : 300 000, HLNUG, August 2007	10
Abbildung 5.1 Untersuchungsgebiet mit Modell- und Kerngebiet.....	14
Abbildung 5.2 Hydrogeologische Übersichtskarte Hessen – Durchlässigkeit [U15].....	17
Abbildung 5.3 Wasserstandsganglinie Rhein Pegel – Stationen Mainz und Worms.....	21
Abbildung 5.4 Karten der Grundwasserneubildung 2001 und 2004.....	23
Abbildung 6.1 Dreidimensionaler Modellraum mit Oberfläche (5-fach überhöht dargestellt).....	25
Abbildung 6.2 Referenz-Messstellen für die Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells.....	27
Abbildung 6.3 gemessene und berechnete Grundwasserstände, Messstelle M 5339.....	27
Abbildung 7.1 Instationärer Ansatz der Entnahmen im Transportmodell durch mehrjährige Mittel (vgl. auch Anlage 5.3.2 und Anlage 3.2).....	30
Abbildung 7.2 Skalenabhängigkeit der longitudinalen Dispersion [U12]	31
Abbildung 7.3 DAG-Austrag im Ablauf der Kläranlage Merck in den Darmbach.....	32
Abbildung 7.4 Abschätzung der Gesamtfrachten an DAG am Standort im Zeitraum 1940 bis 2019.....	37
Abbildung 8.1 Berechnete Dikegulac-Konzentrationen 2019 in µg/l	40
Abbildung 8.2 Berechnete Dikegulac-Konzentrationen 2050 in µg/l	40

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 5.1 Vertikale Schichtenstruktur im Modellraum.	15
Tabelle 5.2 Vertikale Schichtenstruktur im Modellraum.	16
Tabelle 6.1 Mittlere Wasserbilanz für die Jahre 1996 bis 2005.....	28
Tabelle 6.2 kalibrierte Leakage-Faktoren der Gewässer	29
Tabelle 7.1 Ansatz der Infiltrationsmengen über die Rieselfelder, zusammengefasst aus [U11]	32
Tabelle 7.2 Gesamtbilanz der Dikegulac-Fracht 1940 bis 1965 (während des Rieselbetriebes).....	36
Tabelle 7.3 Gesamtbilanz der Dikegulac-Fracht 1966 bis 2019 (nach dem Rieselbetriebes).....	36

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1 Lagepläne

- Anlage 1.1 Übersichtslageplan
- Anlage 1.2 Lageplan Untersuchungsgebiet mit Grundwassermessstellen
- Anlage 1.3 Lageplan Profilschnitte

Anlage 2 Hydrogeologisches Strukturmodell

- Anlage 2.1 Abgrenzung Modellgebiet
- Anlage 2.2 Geländeoberkante
- Anlage 2.3 Basis des oberen Zwischenhorizonts
- Anlage 2.4 Mächtigkeit des oberen Zwischenhorizonts
- Anlage 2.5 Oberkante des oberen Zwischenhorizonts
- Anlage 2.6 Quartärbasis
- Anlage 2.7 Profilschnitte
 - Anlage 2.7.1 Schnitt A – A‘
 - Anlage 2.7.2 Schnitt B – B‘
 - Anlage 2.7.3 Schnitt C – C‘

Anlage 3 Grundwasserhydraulik

- Anlage 3.1 Grundwassergleichen, Oktober 2015
- Anlage 3.2 Entwicklung der Grundwasserstände
 - Anlage 3.2.1 Ganglinien West
 - Anlage 3.2.2 Ganglinien Mitte
 - Anlage 3.2.3 Ganglinien Ost

Anlage 4 Grundwasserbeschaffenheit

- Anlage 4.1 Verteilung der Dikegulac-Konzentration 1990
- Anlage 4.2 Verteilung der Dikegulac-Konzentration 2019
- Anlage 4.3 Entwicklung der Dikegulac-Konzentrationen

Anlage 5 Randbedingungen

- Anlage 5.1 Übersichtskarte Gewässernetz
- Anlage 5.2 Mittlere Grundwasserneubildung 1971 bis 2000
- Anlage 5.3 Grundwasserentnahmen und -infiltrationen
 - Anlage 5.3.1 Übersichtskarte Grundwasserentnahmen/-infiltrationen
 - Anlage 5.3.2 Entwicklung der Grundwasserentnahmen/-infiltrationen

Anlage 6 Numerisches Grundwassermodell

- Anlage 6.1 Modellnetz und Randbedingungen
- Anlage 6.2 Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells
 - Anlage 6.2.1 Vergleich berechnete/gemessene Grundwasserstandsentwicklung, 1995 bis 2005
 - Anlage 6.2.2 Vergleich berechnete/gemessene Grundwassergleichen – Juni 2001

- Anlage 6.3 Verteilung der k_f -Werte – Stand nach Modellkalibrierung
- Anlage 6.3.1 Modellschichten 1, 2, 4, 5 - Oberer Grundwasserleiter
- Anlage 6.3.2 Modellschicht 3 – Oberer Grundwasserleiter
- Anlage 6.3.3 Modellschichten 6 bis 8 - Oberer Zwischenhorizont
- Anlage 6.3.4 Modellschicht 9 und 10 – Mittlerer Grundwasserleiter

Anlage 7 Kalibrierung des Stofftransportmodells

- Anlage 7.1 Vergleich berechnete/gemessene Dikegulac-Ausbreitung, 1940 bis 2019
- Anlage 7.2 Vergleich berechnete/gemessene Dikegulac-Verteilung 2019
- Anlage 7.3 Kalibrierte Masse-Transferrate

Anlage 8 Ergebnisse der Prognoserechnungen, historisch

- Anlage 8.1 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 1990
- Anlage 8.2 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 2005
- Anlage 8.3 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 2019
- Anlage 8.4 Vertikale Dikegulac-Ausbreitung, 1990, 2005, 2019

Anlage 9 Ergebnisse der Prognoserechnungen, zukünftig

- Anlage 9.1 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 2025
- Anlage 9.2 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 2035
- Anlage 9.3 Berechnete Dikegulac-Ausbreitung, 2050
- Anlage 9.4 Vertikale Dikegulac-Ausbreitung, 2025, 2035, 2050

1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Zusammenhang mit der Auswertung der Ergebnisse des Untersuchungsprogrammes Diacetoneketogulonsäure (Dikegulac) im vom Landgraben beeinflussten Grundwasser im Hessischen Ried wurde eine Modellierung der Grundwasserströmungs- und Stofftransportprozesse für das Untersuchungsgebiet durchgeführt, um die Entwicklung der bisherigen und der zukünftigen Dikegulac-Konzentration im Grundwasser zu untersuchen.

Entsprechend den Angaben der Firma Merck verließen im Zeitraum von 1940 bis 2019 eine geschätzte Gesamtmenge von 7.638 Tonnen (t) Dikegulac das Werksgelände. Im Zeitraum von 1940 bis 1965 wurden 615 t über die Rieselfelder und im Zeitraum 1965 bis 2019 wurden 7023 t über den Kläranlagenablauf in das Landgrabensystem abgegeben. Aus vorhandenen Unterlagen und Abschätzungen der Firma Merck wurden ein Großteil des über die Rieselfelder eingetragenen Dikegulacs von Pflanzen aufgenommen oder abgebaut und ca. 10 t gelangten ins Grundwasser. Mit diesen Basisinformationen und allen verfügbaren geologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Daten wurde zunächst ein hydrogeologisches Modell und darauf aufbauend ein 3D-numerisches Grundwasserströmungsmodell für ein ca. 190 km² großes Teilgebiet des Hessischen Rieds erstellt. Das Grundwasserströmungsmodell wurde instationär für den Zeitraum 1996 bis 2005 kalibriert. Anschließend wurde das Modell zu einem Stofftransportmodell für den Parameter Dikegulac (konservative, kein Abbau, keine Retardation) erweitert und anhand der historischen Entwicklung der Dikegulac-Ausbreitung von 1940 bis 2019 kalibriert. Mit dem kalibrierten Stofftransportmodell wurden anschließend Szenarien für historische (1990, 2005 und 2019) sowie künftige Zeitpunkte (2025, 2035 und 2050) berechnet.

Die Modellergebnisse zeigen, dass bis 2019

- ca. 121 t Dikegulac über das Landgrabensystem ins Grundwasser eingetragen und ca. 32 t Dikegulac über Infiltration aus dem Grundwasser in die Gräben wieder ausgetragen wurde,
- ca. 5 t Dikegulac über Brunnen aus dem Grundwasser entnommen wurde.

Zusammen mit den über die Rieselfelder eingetragenen 10 t Dikegulac befinden sich somit aktuell somit noch ca. 94 t Dikegulac im Grundwasserkörper. Ca. 6.934 t, also mehr als 90% der Dikegulacmenge, die das Merck-Gelände im Zeitraum 1940 bis 2019 verlassen hat, gelangte über die Grabensysteme in den Rhein.

Die Modellergebnisse zeigen weiterhin, dass aufgrund eines nur lokal vorhandenen bindigen Trennhorizontes Dikegulac im Bereich zwischen den Brunnen WW Dornheim und den Rieselfeldern im Laufe der Jahrzehnte bis zur Basis des Grundwasserleiters gelangt ist. Diese im Untergrund befindliche Fahne bewegt sich sehr langsam in Strömungsrichtung zum Rhein und zu den lokalen Grundwasserbrunnen. Die Prognoserechnungen ergaben, dass die Dikegulac-Fahne bis

2050 ca. 1 km weiter in Strömungsrichtung (grob nach Westen) abströmen und sich weiter verdünnen wird. Von aktuell max. 500 µg/l gehen die Dikegulac-Konzentrationen im Grundwasser auf max. 250 µg/l im Jahr 2050 zurück. Die Hauptfahne wird sich westlich des Landgrabens bis hin zu den Brunnen des WW Dornheim erstrecken. Östlich der Brunnen des WW Dornheim bis zum Rhein werden 2050 in tieferen Bereichen keine Dikegulac-Konzentrationen über 50 µg/l mehr erwartet, im OGWL liegen bereichsweise noch Werte bis 100 µg/l vor. Unter Beibehaltung der aktuellen (2019) Entnahmen (Menge und Lage der Brunnen) im Prognosezeitraum würde sich die Dikegulacmenge im Grundwasserkörper von aktuell (2019) 94 t durch Austrag über Brunnen und Eintrag über Gewässer/Gräben auf ca. 75 t im Jahr 2050 verringern.

2 VERANLASSUNG UND ZIEL

Dikegulac (DAG) gelangte etwa zwischen 1966 bis 1999 als Abfallprodukt der Ascorbinsäure- (Vitamin C-) Produktion der Firma Merck in das Landgrabensystem und von dort über Infiltrationsvorgänge in das Grundwasser. Vor diesem Zeitraum erfolgte ein Eintrag über die Verrieselung des Abwassers bis 1965.

Ende 2018 wurde infolge der intensiven Beregnung während des trockenen Sommers eine Dikegulac-Belastung bei Spinat in der Nähe von Wallerstädten nahe des Landgrabens gefunden. Daraufhin wurden im Frühjahr 2019 vom HLNUG und HMUKLV Dikegulac im Bereich des Landgrabens an 48 ausgewählten Messstellen und Brunnen untersucht. Die Untersuchung zeigte, dass die aktuellen Dikegulac-Konzentrationen im Grundwasser überwiegend unterhalb des Zielwertes für Trinkwasser von 50 µg/l lagen, vereinzelt lagen Hotspots mit Werten bis max. 470 µg/l vor.

Um die Entwicklung der Dikegulac-Konzentrationen genauer zu untersuchen, wurde CDM Smith mit Schreiben vom 29.08.2019 damit beauftragt, für den betreffenden Teilbereich des Hessischen Rieds ein numerisches Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell zu erstellen. Mit Hilfe des Grundwassermodells sollen die historische Dikegulac-Ausbreitung modelliert und anschließend Prognoserechnungen durchgeführt werden.

Im vorliegenden Bericht sind Aufbau und Kalibrierung und Einsatz des numerischen Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells dokumentiert sowie die Ergebnisse der Prognoserechnungen dargestellt und bewertet.

3 UNTERLAGEN

- [U1] Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft (Hrsg.) (2002): Hydrogeologische Modelle, Ein Leitfaden mit Fallbeispielen; in: Schriftenreihe der Deutschen geologischen Gesellschaft, Heft 24, 2002
- [U2] Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (Hrsg.) (2016): Technische Regel, Arbeitsblatt W 107, Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, Bonn, Februar 2016.
- [U3] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2016): Anforderungen an Grundwassermodelle, HLNUG-Stellungnahme, Wiesbaden, 2016.
- [U4] DHI-WASY GmbH (2015): User's Manual. Wasy Software FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, FEFLOW 6.2, 2015.
- [U5] GIT HydroS Consult GmbH (2015): GWN-BW Kurzbeschreibung des Modells GWN-BW, ergänzte Version Mai 2011.
- [U6] Arcadis Germany GmbH (2018): Antrag Erneuerung Erlaubnisbescheids zur Einleitung von behandeltem Abwasser der Merck in die Vorflut Landgraben / Griesheim, Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie, Anhang 10: Infiltrationsstrecken des Landgrabens / Griesheim, Darmstadt, September 2018.
- [U7] Hoselmann, C. & Lehné, R. (2014): Die quartärgeologische Entwicklung und ein geologisches 3D-Modell des nördlichen Oberrheingrabens. – Geologisches Jahrbuch Hessen, 138: 57-73.
- [U8] Lehné, R.J., Hoselmann C., Heggemann, H., Budde, H. & Hoppe, A. (2013): Geological 3D modelling in the densely populated metropolitan area Frankfurt/Rhine-Main. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 164 (4): 591–603.
- [U9] Hergesell, M. & Berthold, G. (2004): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Jahresbericht 2004.
- [U10] Brand Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (2004): Modellgestützte Untersuchung von Sofortmaßnahmen zur Schadstoffabwehr im geförderten Grundwasser des WW Dornheim, Abschlussbericht, Darmstadt, November 2004.
- [U11] Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (1997): Maßgebende Kriterien, die eine Grundwasseranreicherung durch die Abwasserverrieselung westlich von Darmstadt belegen, Koblenz, Februar 1997.

- [U12] Kinzelbach W. et al. (1996): Berechnungsverfahren und Modelle. Materialien zum Altlastenhandbuch Niedersachsen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996.
- [U13] Fuchs, S. et al. (2017): Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwert und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
- [U14] Wasserstraßen und Schifffahrtsamt Bingen
- [U15] <http://gruschu.hessen.de>
- [U16] <https://www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserkarten>
- [U17] BGS Wasser GmbH: Fließgewässergeometrien der Gewässer Scheidgraben, Lachengraben, Erfelderhauptgraben, Staffelgraben, Stichgraben, Waechterstadtgraben, Schlimmer Graben, Dohlgraben.

4 GRUNDLAGEN

4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt westlich von Darmstadt in Südhessen im Hessischen Ried, einem Teil der Oberrheinischen Tiefebene.

Das Grundwasser im Untersuchungsgebiet wird intensiv zur Trinkwasser- und Brauchwassergewinnung und immer stärker auch für landwirtschaftliche Beregnungsentnahmen genutzt. Maßgebliche Entnehmer sind die Hessenwasser GmbH & Co. KG, die Merck KGaA sowie zahlreiche Beregnungsverbände.

Seit ca. 1880 bis Mitte der 1960iger Jahre wurde auf Flächen westlich von Darmstadt Abwasser der Stadt Darmstadt auf so genannten Riesefeldern eingebracht. Hierbei wurde auch das Abwasser der Firma Merck verrieselt. Seit 1966 wird der Ablauf der städtischen Kläranlage Darmstadt sowie der Kläranlage der Firma Merck in den Darmbach eingeleitet.

Dikegulac gelangte somit seit den 1940iger Jahren bis heute (2019) als Abfallprodukt der Ascorbinsäure- (Vitamin C-) Produktion der Firma Merck zunächst bis 1965 auf die Rieselfelder und ab 1966 in den Darmbach/Landgraben und von den Riesefeldern und dem Darmbach/Landgraben über Infiltrationsvorgänge in das Grundwasser. 1999 stellte die Firma Merck die Vitamin C-Produktion ein. Seitdem wurden und werden nur noch geringe Mengen über den Kläranlagenablauf eingetragen.

4.2 Überblick Geologie und Hydrogeologie

Das Hessische Ried ist ein Teil des nördlichen Oberrheingrabens (NORG) mit tertiären und quartären Ablagerungen und erstreckt sich über eine Länge von 60 Kilometern und eine Breite von 15 bis 20 Kilometern. Es wird im Osten durch den Odenwald und den Sprendlinger Horst, im Westen vom Rhein und im Norden vom Main begrenzt.

Den Untergrund bilden hier mächtige pleistozäne und pliozäne Sedimente, die vorwiegend aus gut durchlässigen fluviatilen Sanden und Kiesen mit schluffigen und tonigen Zwischenlagen bestehen. **Abbildung 4.1** zeigt einen Ausschnitt aus der Geologischen Karte für das betrachtete Untersuchungsgebiet.

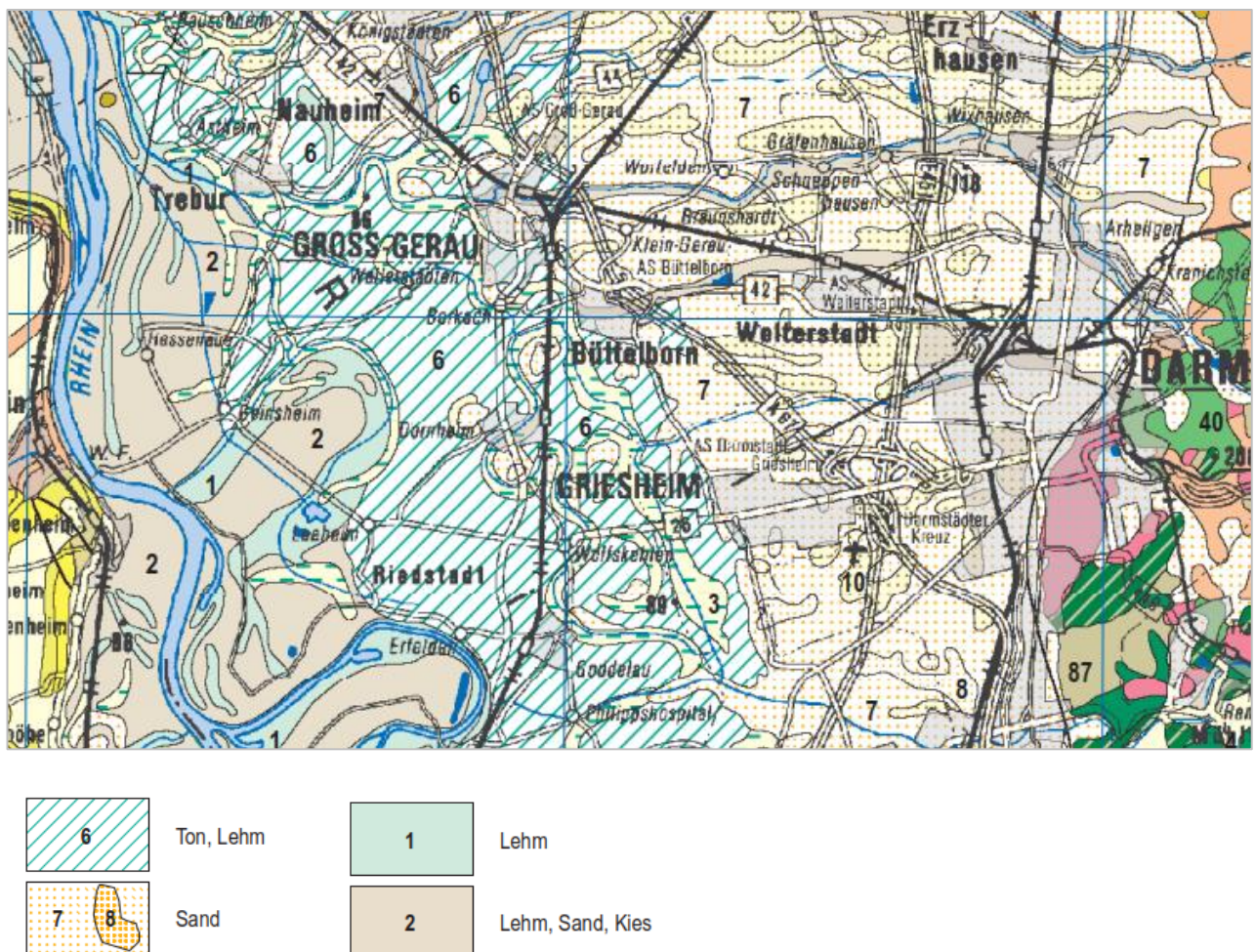


Abbildung 4.1 Ausschnitt aus der Geologischen Karte von Hessen 1 : 300 000, HLNUG, August 2007

Seit den 2000er Jahren wurde durch die staatlichen Geologischen Dienste von Hessen, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz für den nördlichen Oberrheingraben ein neues lithostratigraphisches Konzept und ein neues 3D-Modell des NORG (Nördlicher Oberrheingraben) erarbeitet, (vgl. [U7], [U8]). Dabei kam es auch zur Neuinterpretation der Tiefenlage der Quartärbasis. Im westlichen Teil des Untersuchungsgebiet fällt nach dem neuen Konzept die Quartärbasis deutlich stärker ein und liegt damit deutlich tiefer als zuvor angenommen.

Hydrogeologie

Der quartäre Grundwasserleiter am Standort setzt sich aus einer Wechsellagerung von kiesigen Sanden und sandigen Kiesen zusammen, die nach dem neuen lithostratigraphischen Konzept Mächtigkeiten bis zu 250 m im westlichen Bereich erreichen können [U7], [U8]. Mit Durchlässigkeitsbeiwerten (k_f -Werten) von 1×10^{-4} bis 1×10^{-3} m/s sind die pleistozänen Sande und Kiese am Standort als gut durchlässige Porengrundwasserleiter zu bezeichnen, die wasserwirtschaftlich sehr bedeutsam sind.

Den mächtigen Porengrundwasserleitern sind schluffige und tonige Schichten unterschiedlicher Mächtigkeit zwischengeschaltet. Ein für die Wasserwirtschaft wichtiger und verbreiteter nicht- oder geringleitender Horizont ist der Obere Zwischenhorizont (OZH), der den Oberen Grundwasserleiter (OGWL) vom mittleren Grundwasserleiter (MGWL) trennt. Der OZH ist am Standort jedoch nicht durchgehend ausgebildet. Während er im Bereich Darmstadt im östlichen Bereich des Untersuchungsgebiet mit Mächtigkeiten bis 10 m und mehr deutlich ausgebildet ist, ist der OZH weiter westlich im Umfeld des Landgrabens geringer ausgebildet oder fehlt vollständig. Die hydraulische Trennwirkung des OZH wird von seiner Mächtigkeit und Ausbildung bestimmt.

Die mittleren Flurabständen liegen bei ca. 1 bis 2 m im Westen bis ca. 20 m im Bereich von Darmstadt am östlichen Modellrand.

5 ENTWICKLUNG DES HYDROGEOLOGISCHEN STANDORTMODELLS

Ein hydrogeologisches Modell ist nach [U1] eine Abstrahierung der hydrogeologischen Verhältnisse und Zusammenhänge und bildet die wesentliche Grundlage für die Beschreibung und Prognose hydrogeologischer Vorgänge.

5.1 Datengrundlage

Zunächst wurden alle für den Standort und die Aufgabenstellung relevanten und vorhandenen Daten und Unterlagen zusammengestellt, aufbereitet und geprüft.

Wesentliche Daten zur Erstellung eines hydrogeologischen Modells sind Daten zu Grundwasserständen und -entnahmen, zur Grundwasserneubildung, sowie zu Wasserständen und Abflüssen der Oberflächengewässer. Daneben sind geologische, hydrogeologische und topografische Karten sowie Bohraufschlüsse von Relevanz.

Im Einzelnen liegen folgende Daten und Unterlagen vor:

- Geologische, hydrogeologische, topographische Karten
 - Bohrdaten (Bohrprofile, Aufschlüsse)
 - Grundwasserstandsdaten (Zeitreihen, Grundwasserkarten HLNUG)
 - Wasserstandsdaten von Oberflächengewässern (Rhein, sonstige Gewässer)
 - Gewässertrassen, Gewässerprofile (Rhein und sonstige Haupt- und Nebengewässer)
 - Beschaffenheitsdaten (Dikegulac), Einleitkonzentrationen (Dikegulac)
 - Grundwasserentnahmen /-infiltrationen
 - Grundwasserneubildung: Verteilung mittlere GWN 1971 bis 2000, Verteilung mittlere GWN 2003 bis 2018, Jahresmittel der Grundwasserneubildung für 1996 bis 2005
 - Sonstige Unterlagen/Daten zu Untergrundkennwerten (k_f -Werte, Porosität, Leakagekoeffizienten)
 - Weitere vorhandene geologische / hydrogeologische Gutachten
-
- Aus diesen Unterlagen konnten mehr als 300 Grundwassermessstellen (amtliche Messstellen sowie Messstellen privater Betreiber)
 - Grundwasserzeitreihen, teilweise seit 30iger Jahren (bis 90 Jahre)
 - Wasserstandszeitreihen des Rheins an amtlichen Pegeln
 - ca. 800 Brunnen (ca. 700 im Modellgebiet, hiervon ca. 600 Beregnungsbrunnen)
 - ca. 1900 Bohrungen sehr unterschiedlicher Qualität (hiervon ca. 45 Stellen bis in Tertiär oder Rotliegendes (am nordwestlichen Modellbereich) reichend

für die Erstellung und Analyse von

- Grundwasserganglinien
- Grundwassergleichenplänen, geologischen Profilschnitten und Höhenkarten der Schichtoberflächen
- Wasserstandsganglinien der Oberflächengewässer mit Längsschnitten mit Sohlhöhe und Wasserstand
- räumliche Verteilung und Ganglinien der Dikegulakkonzentrationen
- Grundwasserentnahmen und deren zeitlicher Entwicklung
- der mittleren Grundwasserneubildung

verwendet werden. Die Auswertungen und Analysen der Daten werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

5.2 Untersuchungsgebiet und Modellraum

Die Abgrenzung erfolgt gemäß [U2] in Untersuchungs-, Modell- und Aussagegebiet. Das Untersuchungsgebiet muss nach [U1] alle für die Fragestellungen relevanten hydrogeologischen Strukturen und Fließsysteme enthalten. Für das Untersuchungsgebiet werden alle wesentlichen Strukturen analysiert und darauf aufbauend der Modellraum bzw. das Modellgebiet abgegrenzt.

Der Modellraum liegt innerhalb des Untersuchungsgebiets und muss ausreichend groß gewählt werden, so dass mindestens der Kernbereich der nachgewiesenen Dikegulac-Fahne innerhalb der Modellgrenzen liegt. Einflüsse aus dem gesamten Untersuchungsraum werden durch Randbedingungen wie Zu- und Abflüsse an den Modellrändern abgebildet (**Anlage 6.1**).

5.2.1 Horizontale Modellabgrenzung

Die horizontale Modellabgrenzung muss nach hydrogeologischen und geohydraulischen Kriterien ausreichend groß bemessen sein. Die Modellgrenzen sollten sich dabei im Idealfall an natürlichen geohydraulischen Grenzen (z.B. Vorfluter, Wasserscheiden, Rand des Einzugsgebietes etc.) orientieren.

Grundlagen für die Festlegung der horizontalen Modellgrenzen sind dabei:

- die Analyse der geologischen und hydrogeologischen Karten.
- die Analyse der Zeitreihen der Wasserstandsmessungen an den Grundwassermessstellen und der Oberflächengewässer zusammen mit der Analyse der entsprechenden Bohrprofile.

Abbildung 5.1 zeigt die Modellabgrenzung für das relevante Modellgebiet. Der Rhein bildet im **Westen** eine geohydraulische Grenze, da er als Vorfluter für das Grundwasser dient. Das Modell kann im Norden somit an einer natürlichen Grenze, dem Rhein, abgegrenzt werden. Als Grundlage für die **nördliche, südliche und östlichen Modellabgrenzung** dienen die jährlichen Grundwassergleichenpläne des HLNUG [U16].

Aus dem großräumlichen Grundwassergleichenplan des quartären Grundwasserleiters ergibt sich, dass am nördlichen und südlichen Modellrand eine Randstromlinie (Randbedingung 2. Art: Zu-/Abstrom = 0) angesetzt werden kann. Im Osten wird das Modell entlang einer Äquipotentiallinie abgegrenzt.

Das Modellgebiet reicht damit etwa von Rheinabschnitt Fluss-km 472 bis 488 und ergibt eine maximale Modellbreite von ca. 19 km. Der Modellraum umfasst eine Gesamtfläche von ca. 190 km².

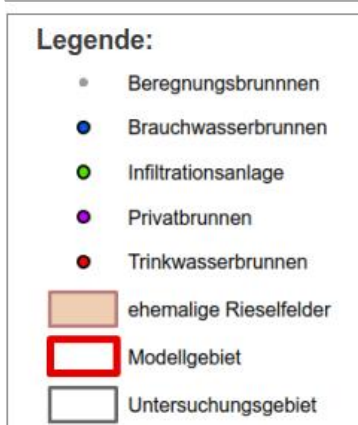
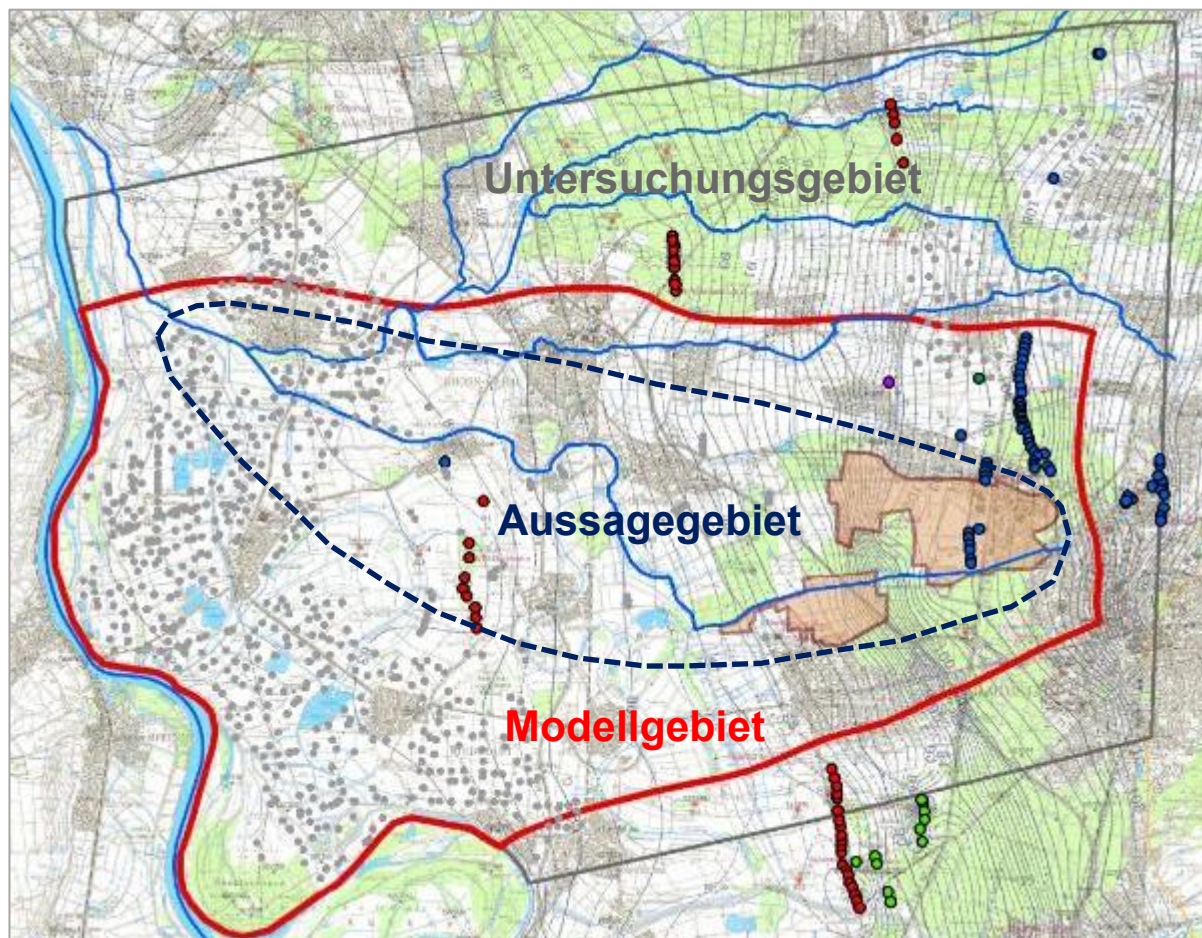


Abbildung 5.1 Untersuchungsgebiet mit Modell- und Kerngebiet

5.2.2 Vertikale Abgrenzung und Strukturierung des Modellraumes

Die vertikale Modellabgrenzung muss nach hydrogeologischen Gesichtspunkten so gewählt werden, dass alle für die Aufgabenstellung relevanten hydrogeologischen Schichten enthalten

sind. Zur Festlegung der Begrenzung wurden alle vorliegenden Bohrprofile gesichtet und daraus die in der **Anlage 1.3** dargestellten Profilschnitte entwickelt und ausgewertet. Diese sind in **Anlage 2.7** dargestellt.

Aus allen vorliegenden Bohrprofilen wurden die jeweiligen Schichthöhen (Geländeoberfläche, Oberfläche und Basis des Zwischenhorizontes sowie Quartärbasis) analysiert, um die Schichtengrenzen für das Modell zu entwickeln. Aufgrund der Unsicherheiten, die sich hinsichtlich Qualität der Aufschlüsse zeigten, wurde im Rahmen dieses Projektes auf die Ergebnisse der geologischen Modellierung des NORG zurückgegriffen, die durch die geologischen Landesämter durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.2).

Die Höhenlage der quartären Basis wurde gemäß der 3D-Modellierung NORG direkt übernommen. Für den OZH wurde die Verbreitungskarte des OZH gemäß der 3D-Modellierung NORG übernommen und für die Flächen, für die hierin ein OZH vorhanden ist, die Höhen für Oberkante und Unterkante des OZH aus den vorliegenden Aufschlüssen ermittelt und flächig interpoliert. Diese Höhenkarten sind Grundlage für die Erstellung des Modellnetzes und der Modellgeometrie.

Aus den vorliegenden hydrogeologischen Informationen (Ergebnisse 3D-Modell NORG, Aufschlüsse, Profilschnitte etc.) wurde eine vertikale Struktur abgeleitet, die ein schematisiertes Abbild der realen Untergrundverhältnisse darstellt. Der Untergrund im Modellraum ist in die in der nachfolgenden **Tabelle 5.1** aufgeführten grundlegenden geologischen Schichten gegliedert. Hierbei werden bei der Klassifizierung der hydrogeologischen Schichten Grundwasserleiter (GWL) und Grundwassergeringleiter (GWG) unterschieden.

Tabelle 5.1 Vertikale Schichtenstruktur im Modellraum.

Geologische Schicht	Schicht	Bezeichnung	Hydrogeologische Schicht	Mächtigkeit [m]
Quartär	Quartärer Grundwasserleiter 1	OGWL	GWL	25 - 110
	Oberer Zwischenhorizont	OZH	GWG	0 – 20
	Quartärer Grundwasserleiter 2	MGWL	GWL	10 - 250

Vertikal wird das Modell wie folgt abgegrenzt:

- Den oberen Abschluss bildet die Geländeoberfläche (**Anlage 2.2**).
- Bereichsweise liegen im östlichen Modellbereich bindige Trennschichten vor, die im Modell als Oberer Zwischenhorizont abgebildet wird. Demnach liegen lokal teilgespannte Verhältnisse vor.
- Die Basis des natürlichen Porengrundwasserleiters bzw. die Oberfläche des Tertiärs ist in **Anlage 2.6** gegeben.

5.3 Hydrogeologische Parameter

Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte

Gemäß der Hydrogeologischen Übersichtkartierung [U15] liegen im Untersuchungsgebiet im quartären Grundwasserleiter mittlere Durchlässigkeiten von 1×10^{-4} bis 1×10^{-3} m/s vor (vgl. **Abbildung 5.2**).

Daten zur hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrunds im Modellraum wurden im Rahmen von Siebkurvenanalysen und Pumpversuchen [U10] ermittelt. Gemäß dieser Information liegen im Grundwasserleiter im Bereich des Landgrabens über die Tiefe konstante k_f -Werte von 1×10^{-4} m/s bis 9×10^{-4} m/s vor. Gemäß den Untersuchungen von BGS [U10] liegt im Bereich der Brunnen 1 bis 6 eine Kieslinse bei ca. 55 m u. GOK vor. Entsprechend werden hier lokal vergleichsweise höhere k_f -Werte angesetzt.

Aufgrund von wechselnden horizontalen Schichtenabfolgen etwas geringer und etwas stärker durchlässiger Schichten und Einlagerungen ergibt sich üblicherweise eine Anisotropie der Durchlässigkeit zwischen horizontaler und vertikaler Richtung. Dies führt zu einer Verringerung der vertikalen Durchlässigkeit, die mit etwa einem Faktor 10 abgeschätzt wird.

Tabelle 5.2 Vertikale Schichtenstruktur im Modellraum.

Geologische Schicht	Schicht	Bezeichnung	k_f [m/s]
Quartär	Oberer Grundwasserleiter	OGWL	1×10^{-4} bis 1×10^{-3}
	Oberer Zwischenhorizont	OZH	1×10^{-9}
	Mittlerer Grundwasserleiter	MGWL	1×10^{-4} bis 1×10^{-3}

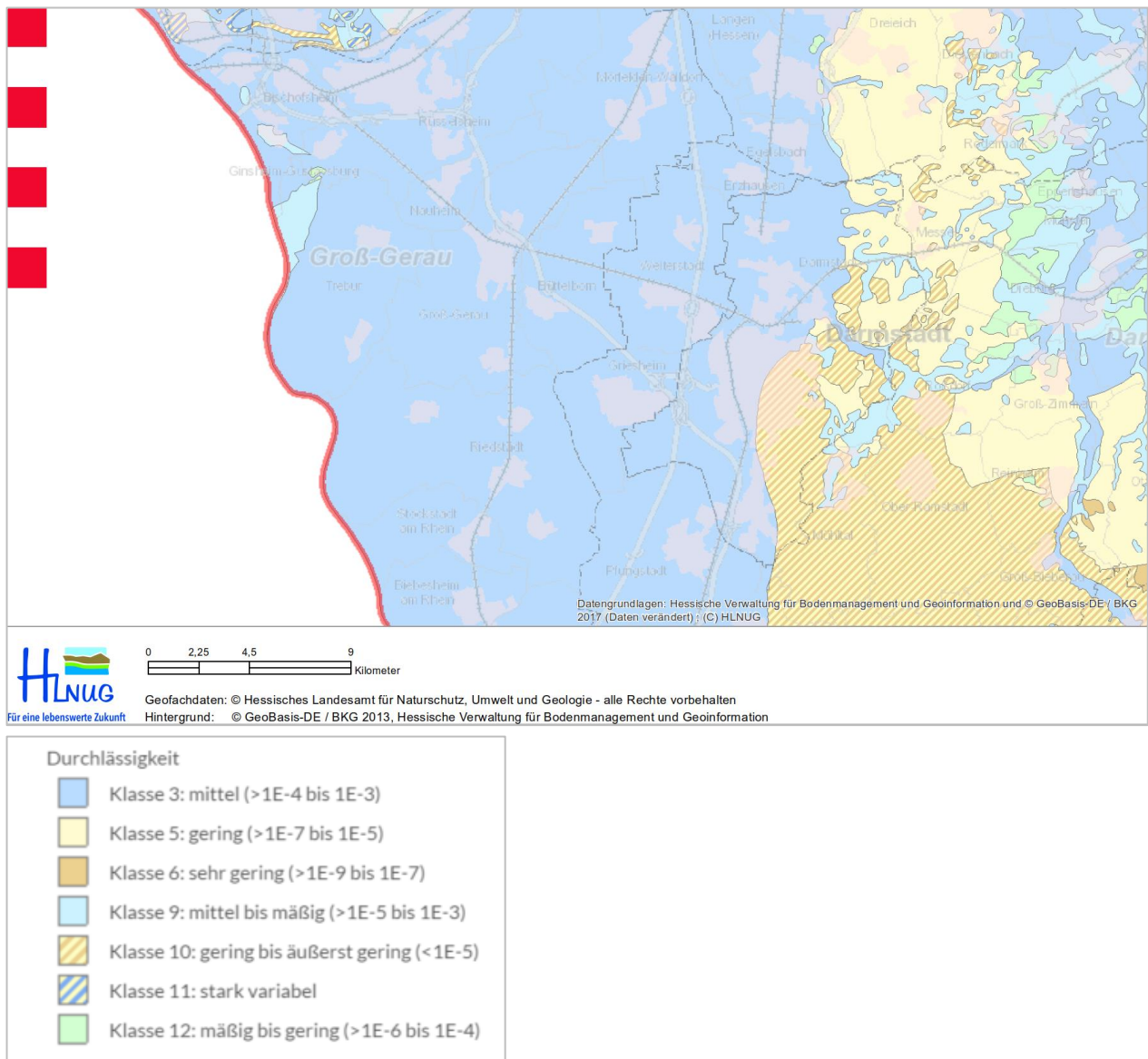


Abbildung 5.2 Hydrogeologische Übersichtskarte Hessen – Durchlässigkeit [U15]

Speicherkoeffizient, nutzbare Porosität

Die nutzbare Porosität n_e ist im Allgemeinen eine Funktion der Durchlässigkeiten, für deren Berechnung es unterschiedliche Ansätze gibt. Nach HENNING [U13] wird diese wie folgt ermittelt:

$$n_e = 0,4 + 0,05 \cdot \log(k_f)$$

Für die maßgebliche grundwasserleitende Schicht mit k_f -Werten von 1×10^{-4} bis 1×10^{-3} m/s ergibt sich damit eine nutzbare Porosität von ca. 0,20 bis 0,25.

Überwiegend liegen im Modellgebiet ungespannte, freie Grundwasserverhältnisse vor. Nur am Ostrand des Modells sind aufgrund des lokal stärker verteilten OZH teilgespannte bis gespannte Verhältnisse vorhanden. Der spezifische Speicherkoeffizient wird daher einheitlich mit $1 \cdot 10^{-4}$ 1/m abgeschätzt.

5.4 Grundwasserhydraulik

5.4.1 Grundwasserströmung

An den Messstellen im Untersuchungsgebiet wurden vom HLNUG (zuvor HLOG) seit 1957 Grundwasserstandsmessungen durchgeführt und in Form von Grundwassergleichen ausgewertet, um die Grundwasserströmung zu erfassen (vgl. [U16]).

Wie u.a. die Grundwasserkarte für Oktober 2015 – bei etwa mittleren aktuellen Verhältnissen – zeigt (vgl. Anlage 3.1), liegt im Allgemeinen im Untersuchungsgebiet eine nach Westen zum Rhein gerichtete Grundwasserfließrichtung vor. Das Grundwassergefälle reicht von einem vergleichsweise sehr geringen Gefälle von ca. 0,3 ‰ im westlichen Bereich bis ca. 1 ‰ auf der Länge der Ortschaft Weiterstadt. Nur am Ostrand des Modells im Übergang zum Odenwald ist ein stärkeres Grundwassergefälle mit ca. 10 ‰ vorhanden. Im Bereich der Gewinnungsanlagen mit maßgeblichen Entnahmemengen sind Entnahmetrichter mit stärkerem Gefälle ausgebildet.

Bis Ende der 1950iger Jahre lagen im Modellgebiet bereichsweise hohe Grundwasserstände vor. Mit Beginn der Entnahmen durch das WW Dornheim und die Firma Merck) lagen die Grundwasserstände ab den 1960er Jahren um bis 8 Meter tiefer. Erst mit der Reduzierung der Entnahmen Mitte/Ende der 1990er Jahre reduzierte sich dies auf ca. 1 bis 5 m Differenz.

Die aufgenommenen Bohrprofile und Grundwasserstände zeigen, dass im Untersuchungsgebiet im Mittel überwiegend ungespannte Grundwasserverhältnisse charakteristisch sind. In einigen Bereichen des Modellgebietes sind aufgrund des lokal stärker verteilten OZH teilweise gespannte Verhältnisse vorhanden.

Die Fließgeschwindigkeiten sind im Modellgebiet aufgrund des geringen Gefälles mit ca. 3,6 bis 7,2 m/Jahr vergleichsweise gering.

5.4.2 Entwicklung der Grundwasserstände

Es lagen zahlreiche Grundwasserstands-Zeitreihen an amtlichen Messstellen und den Messstellen der Firmen Merck und Hessenwasser mit unterschiedlichen Messintervallen und Erfassungszeiträumen vor.

Als Grundlage zur Modellerstellung wurden die Zeitreihen an ausgewählten repräsentativen Messstellen in Form von Ganglinien aufbereitet. Die Ganglinien der Grundwasserstände sind – unterteilt in die Teilbereiche West, Mitte und Ost in **Anlage 3.2** dargestellt.

Insgesamt schwanken die Grundwasserstände im Modellgebiet im Gesamtzeitraum seit 1940 relativ stark. Durch die starke Zunahme der Grundwassernutzung für die Trinkwasser- und Brauchwassergewinnung in den 1960iger Jahren gingen die Grundwasserstände in dieser Zeit um bis zu 8 m zurück.

Im Teilbereich West überwiegen die hydrologischen Einflüsse und die Grundwasserstände schwanken im üblichen Jahresgang von 0,5 m bis 1,5 m. Im zentralen Bereich im Umfeld der Wassergewinnung Dornheim ist in den 1960iger Jahren ein Rückgang des Grundwasserstandes um ca. 1 bis 2 m zu verzeichnen. Besonders hohe Änderungen lagen im östlichen Modellbereich – im Bereich der Entnahmebrunnen der Firma Merck – vor. Entnahmebedingt sanken hier die Grundwasserstände in den 1960igern um bis zu 8 m und stiegen Ende der 1990iger Jahre um bis zu 5 m wieder an.

An allen Messstellen im Modellraum ist eine hydrologische Beeinflussung mit jahreszeitlichen Schwankungen erkennbar.

Als Referenzzeitraum für die instationäre Kalibrierung der Grundwasserströmung wurde aus den vorliegenden Daten ein repräsentativer aktueller Zeitraum mit vergleichsweise starken Grundwasserstandsänderungen von 1996 bis 2005 gewählt. Hier war aufgrund des Entnahmerückganges ein Anstieg des Grundwasserniveaus um bis zu 5 m zu verzeichnen.

5.4.3 Dikegulac-Konzentrationen

Seit den 1990iger Jahren werden die Dikegulac-Konzentrationen an mehr als 100 Grundwassermessstellen und Brunnen sowie in Oberflächengewässern und Eintragsstellen in unterschiedlichen Zeitintervallen erfasst. Für ca. 35 Messorte lagen langzeitliche Messreihen zu Dikegulac vor, die in Form von Ganglinien ausgewertet wurden (vgl. **Anlage 4.3**).

In den 1990iger Jahren lagen besonders hohe DAG-Befunde mit Werten bis etwa 500 µg/l im nördlichen Bereich des Wasserwerkes Dornheim vor. Lokal an einer Messstelle (N113) in unmittelbarer Nähe des Landgrabens sogar 10.400 µg/l. Die Ganglinien der Dikegulac-Konzentrationen zeigen einen deutlichen Rückgang der Dikegulac-Konzentrationen Anfang der 1990iger Jahre. Seit 1993 wurden keine Werte über 700 µg/l gemessen. Dies ist bedingt durch den deutlichen Rückgang des Dikegulac-Eintrages in den Darmbach. Von 2003 bis 2013 ist lokal an einigen Messstellen wieder ein Anstieg der DAG-Konzentrationen erkennbar.

Aktuell liegen die DAG-Konzentrationen überwiegend bei $< 50 \mu\text{g/l}$. Lokal wurden an einigen Hotspots höhere Befunde mit einigen $100 \mu\text{g/l}$ vorgefunden. Eine flächige Fahnenausbreitung lässt sich daraus jedoch nicht ableiten.

5.5 Randbedingungen

Die Grundwasserverhältnisse im Modellraum werden durch folgende, innere und äußere Randbedingungen beeinflusst:

- Wechselwirkungen mit Oberflächengewässern,
- Grundwasserentnahmen und -Infiltrationen,
- Grundwasserneubildung durch Niederschlag,
- Randströme (Volumenströme über den Modellrand).

5.5.1 Oberflächengewässer

Eine Übersichtskarte des Gewässernetzes ist in **Anlage 5.1** gegeben. Im Modellraum vorhandene Oberflächengewässer sind in die Kategorien Haupt- und Nebengewässer untergliedert. Zu den Hauptgewässern gehören u.a. der an der westlichen Modellgrenze vorhandene Rhein (Hauptvorfluter) sowie der Landgraben, Schwarzbach und Mühlbach. Zu den Nebengewässern gehören bspw. der Hauptgraben, Lachengraben sowie der Scheidgraben.

Im Bereich des Untersuchungsgebiets stehen für den Rhein mehrere Gewässerpegel des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bingen [U14] zur Verfügung, an denen die Wasserstände des Rheins regelmäßig erfasst werden. Die Wasserstandsganglinien des Rheins an den Stationen Mainz und Worms sind für den Zeitraum 1960 bis 2019 in **Abbildung 5.3** dargestellt. Pegeldaten an sonstigen Gewässern lagen für das Modellgebiet nicht vor. Für den Modellansatz wurden als Abschätzung eines annähernd mittleren Zustandes die vom HLNUG zur Verfügung gestellten Gewässerprofile verwendet. Hierbei wurden die in den Profilen hinterlegten Messwerte für den Wasserstand verwendet.

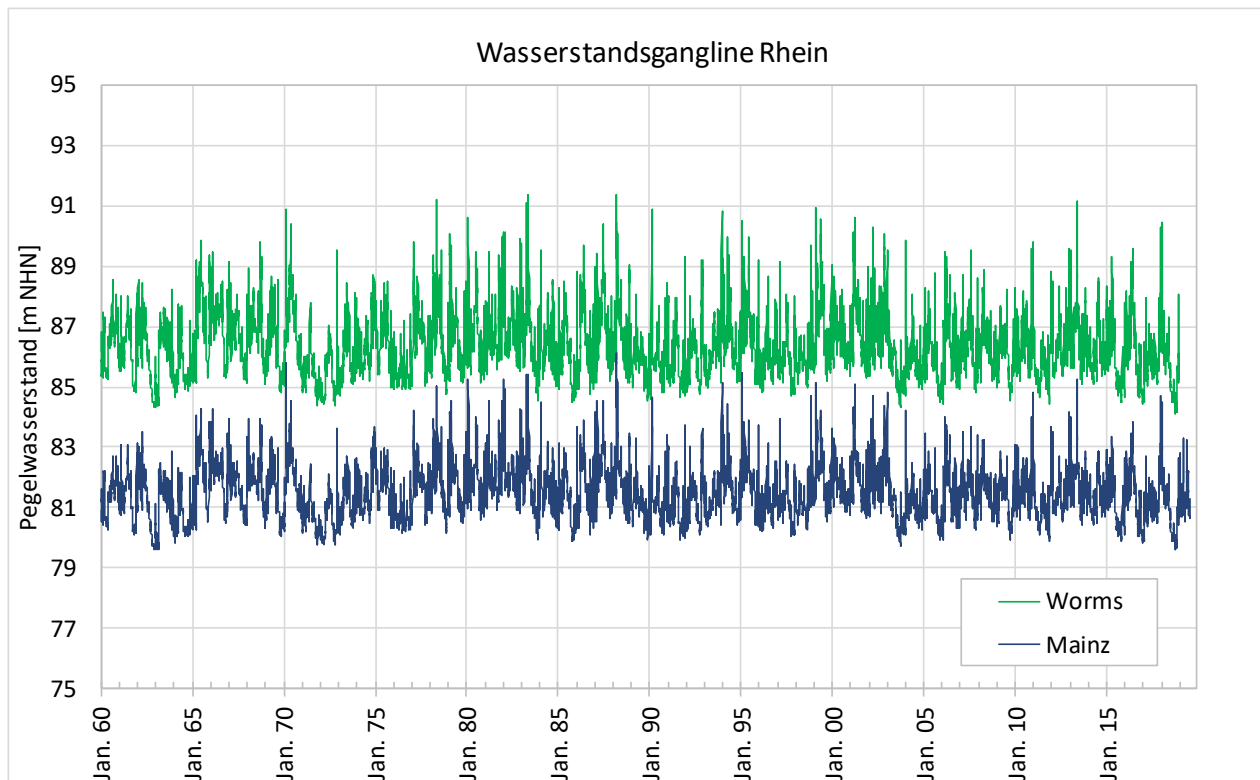


Abbildung 5.3 Wasserstandsganglinie Rhein Pegel – Stationen Mainz und Worms

5.5.2 Grundwasserentnahmen

Im Modellgebiet sind eine Reihe von Grundwasserentnahmen vorhanden, im Wesentlichen folgende:

- Wassergewinnung Dornheim
- Brauchwasserbrunnen der Firma Merck
- Beregnungsbrunnen der Beregnungsverbände

Für den Modellraum wurden die Entnahmedaten als Jahresentnahmen für den Zeitraum 1960 bis 2018 zusammengestellt. Für das Wasserwerk Dornheim lagen die Daten für die Brunnen 1 bis 4 bezogen auf die Einzelbrunnen vor sowie jeweils für die Brunnengruppen 5 bis 8 und 9 bis 11 vor. Die sonstigen Entnahmen waren überwiegend ebenfalls als Gesamtmengen je Entnehmer bzw. Beregnungsverband vorhanden. Bei den Brunnen der Firma Merck wurden die Gesamtmengen je Brunnengruppe (z.B. Waldbrunnen, etc.) zusammengestellt.

Die vorhandenen Entnahmedaten insbesondere die Beregnungsentnahmen sind zum Teil lückenhaft. Für einige Brunnen oder Brunnengruppen liegen auch keine erfassten Jahresmengen

vor. In diesem Fall wurde der genehmigte Bescheidswert zu Grunde gelegt. Der Erfassungsgrad beträgt ca. 80 %.

Anlage 5.3.1 zeigt eine Übersicht über die Lage und die Verteilung der Einzelbrunnen im Modellgebiet, in der **Anlage 5.3.2** ist die Entwicklung der Entnahmen betreiberbezogen dargestellt.

Die Darstellungen zeigen Folgendes:

- Einen Rückgang der Gesamtentnahmen um ca. 10 Mio. m³/a von 1990 bis 2008
- **Brunnen Fa. Merck:** Einen Rückgang der Entnahmen der Fa. Merck um ca. $\frac{3}{4}$ auf 1,5 Mio. m³/a im Zeitraum 1990 bis 2000
- **WW Dornheim:** Einen Rückgang der Entnahmen WW Dornheim um ca. $\frac{1}{3}$ auf 5 Mio. m³/a im Zeitraum 1992 bis 2000

5.5.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist das in das Grundwasser durch den Boden gelangende Wasser, welches vor allem aus Niederschlag gebildet wird. Für das Modellgebiet wurden vom HLNUG flächige Verteilungen des langjährigen Mittels der Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971 – 2000) sowie der Jahresmittel für die Jahre 1996 bis 2005 zur Verfügung gestellt. Die räumlich differenzierte Ausbreitung des langjährigen Mittels ist mit einem Raster von 100 m x 100 m in **Anlage 5.2** dargestellt.

Die Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung erfolgte nach dem Verfahren GWN-BW der Fa. GIT Hydros Consult auf der Grundlage vorliegender Eingangsdaten (Flurabstand, Niederschlags-, Klima-, Boden- und Landnutzungsdaten) und wurde durch das HLNUG bereitgestellt. GWN-BW ist ein flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der Evapotranspiration und des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. Eine detaillierte Beschreibung ist in der Kurzbeschreibung zur Software GWN-BW enthalten [U5].

Die mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag liegt im Modellgebiet im Mittel bei ca. 73,3 mm/a bzw. ca. 2,3 l/s km². Dies ergibt für die Gesamtfläche des Modellgebietes einen Gesamtzustrom über Grundwasserneubildung von ca. 14 Mio. m³/a. Die flächendifferenzierte Ausbildung der Grundwasserneubildung wird als Randbedingung im Grundwassermodell angesetzt.

Für die instationäre Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells wurden vom HLNUG analog des langjährigen Mittels differenzierte Karten der Grundwasserneubildung für die Jahre 1996 bis 2005 zur Verfügung gestellt. **Abbildung 5.4** zeigt die Grundwasserneubildung beispielhaft für ein nasses (2001) und ein trockenes (2004) Jahr. Im „nassen“ Jahr 2001 sind insbesondere im Nordostbereich des Modellgebietes besonders hohe Grundwasserneubildungsraten bis ca.

380 mm/a zu verzeichnen, wohingegen im Trockenjahr hohe Verdunstungsraten und damit geringe Grundwasserneubildung im Bereich der Gewässer im westlichen Bereich des Modellgebietes vorliegen.

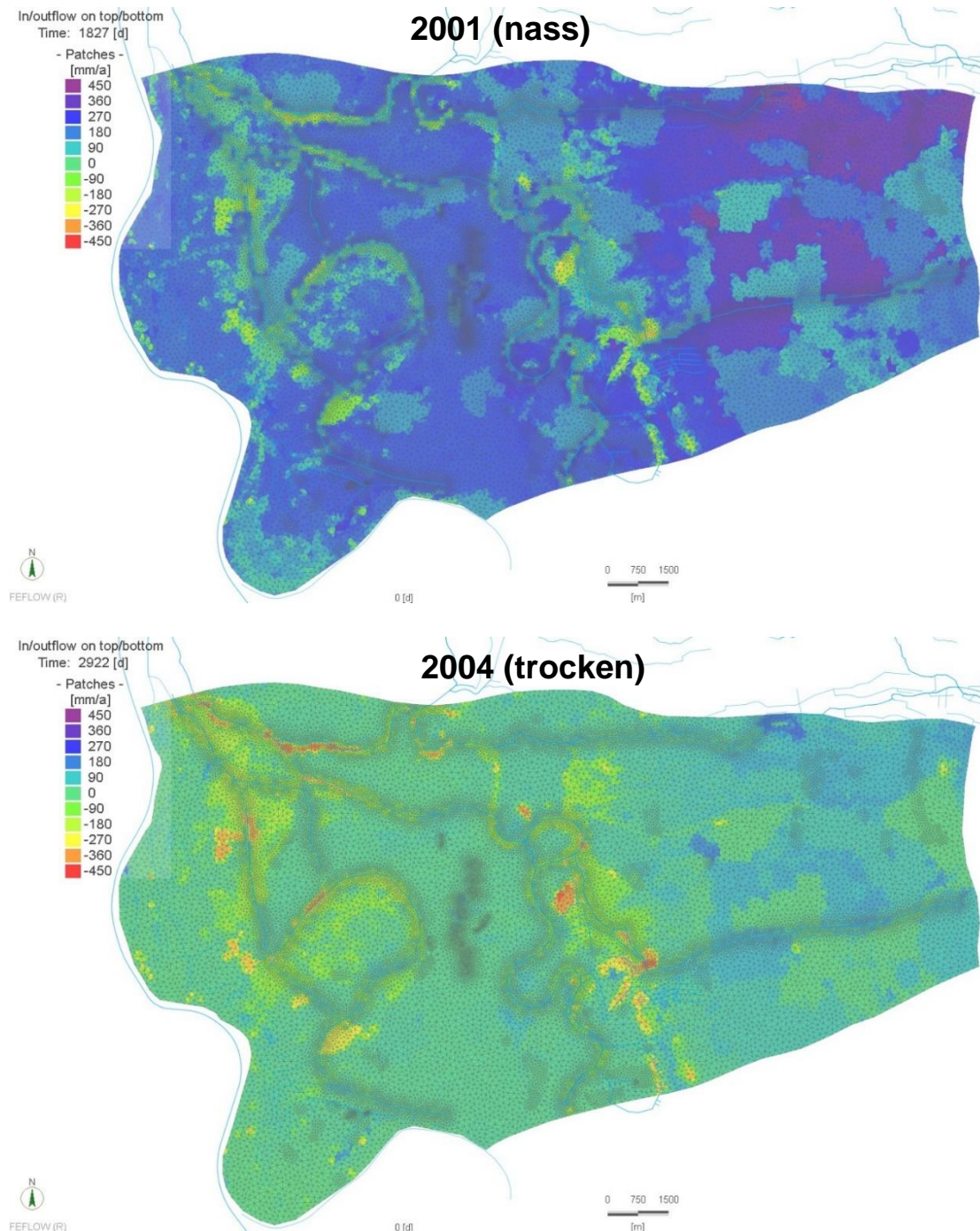


Abbildung 5.4 Karten der Grundwasserneubildung 2001 und 2004

5.5.4 Modellränder

Ein wichtiger Punkt bei der Entwicklung eines Grundwassermodells ist die Festlegung der Modellrandbedingungen, um die Strömungsverhältnisse am bzw. über den Modellrand abzubilden [U1]. Hierfür stehen drei Typen zur Verfügung:

- *Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ):*
Hier werden konstante Wasserstände (Festpotentiale), z.B. an Seen, größeren Flüssen und am Meer, vorgegeben.
- *Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ):*
Es werden konstante Gradienten vorgegeben. Dies entspricht einem konstanten Volumenstrom über den Modellrand, z.B. am Rand zu einem Gebirge. Ein Sonderfall ist die Randstromlinie mit einer Flussrate von $Q = 0$, z.B. an einer Wasserscheide.
- *Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ):*
Eine Kombination aus den Randbedingungen 1. und 2. Art ist die Randbedingung 3. Art, eine Leakage-Randbedingung mit einem Festpotential in Verbindung mit einem hydraulischen Widerstand. Diese Randbedingung wird z.B. an offenen Gewässern angesetzt.

Am westlichen Rand des Modellgebiets wird am Vorfluter Rhein eine Gewässer-Randbedingung (Randbedingung 3. Art), am nördlichen und südlichen Modellrand eine Randstromlinie (Randbedingung 2. Art: Zu-/Abstrom = 0) angesetzt. Der östliche Modellrand wird so definiert, dass er entlang der Äquipotentiallinie (Grundwassergleiche mit Wasserstandhöhe von 115,0 m ü. NN für Oktober 2015) verläuft. Hier wurde ein Festpotential angenommen. Für die instationäre Kalibrierung wurden diese entsprechend der gemessenen Werte instationär angesetzt (1996: 113 m u. NN, ab 2003: 116 m ü. NN).

6 NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL

6.1 Modellaufbau

6.1.1 Eingesetzte Software und Modellnetz

Auf Basis des ergänzten Hydrogeologischen Modells wurde ein dreidimensionales numerisches Finite-Element-Grundwasserströmungsmodell mit dem Programmsystem FEFLOW erstellt [U4]. Das gewählte Modellgebiet erstreckt sich entlang des nördlichen Hessischen Rieds vom Rhein bis zur Grenze des Odenwaldes über eine Fläche von ca. 190 km² (ca. 19 km x 10 km) und einer Tiefe von 80 m (im Westen) bis 330 m (im Osten). **Abbildung 6.1** zeigt die dreidimensionale Struktur des Modells.

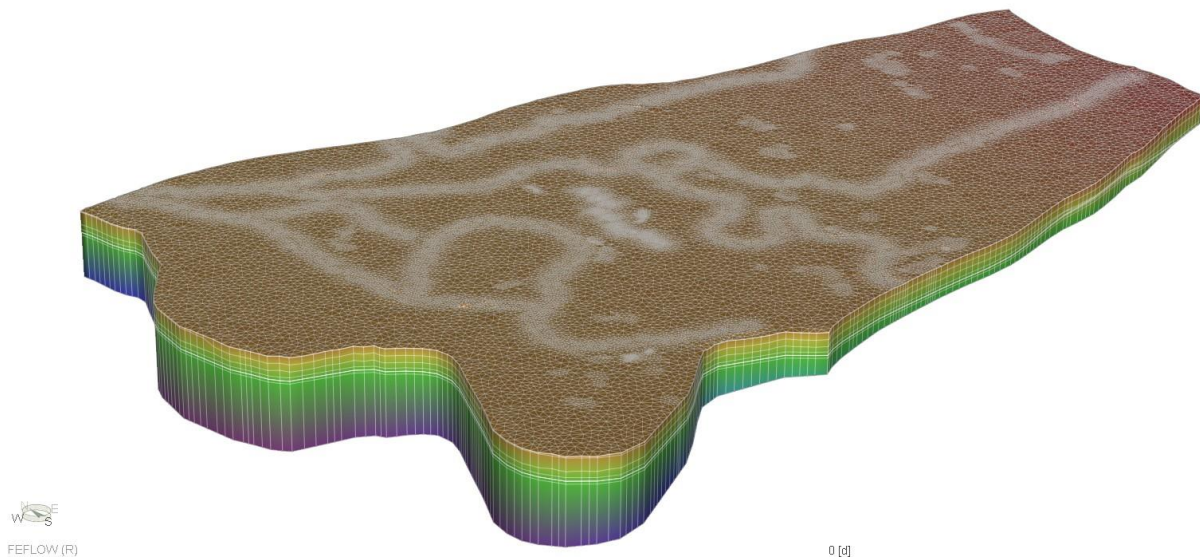


Abbildung 6.1 Dreidimensionaler Modellraum mit Oberfläche (5-fach überhöht dargestellt)

Mit dem Modellnetz werden die Strukturen des Untergrundes in „Finite Elemente“ aufgeteilt. Das vorliegende Grundwassermodell hat ein Modellnetz mit 3 horizontalen Schichten mit jeweils ca. 149.800 Elementen, d.h. insgesamt ca. 449.400 Elemente. Die Netzweite beträgt zwischen ca. 15 cm im Bereich der Gewässer bis zu ca. 120 m im weiteren Umfeld.

Die hydrogeologische Struktur des Untergrundes wird im Modell in insgesamt 10 Modelllayer aufgeteilt. Die oberste geologische Schicht aus dem Hydrogeologischen Modell, in dem im Wesentlichen der Stofftransport stattfindet, wurde entsprechend in insgesamt 5 Modellschichten umgesetzt. Der OZH wurde aus numerischen Gründen in 3 Modelllayer umgesetzt, damit es durch die geometrische k_f -Wert-Mittelung nicht zu einer Überbewertung der Durchströmung in der bindigen Zwischenschicht kommt. Für den Mittleren Grundwasserleiter wurden 2 Modelllayer angesetzt:

- Oberer Grundwasserleiter (OGWL): 5 Modelllayer
- oberer Zwischenhorizont (OZH): 3 Modelllayer
- Mittlerer Grundwasserleiter (MGWL): 2 Modelllayer

6.1.2 Modellrandbedingungen

Oberflächengewässer

Der Austausch Oberflächengewässer und Grundwasser wird über die Leakage-Randbedingung (Randbedingung 3. Art, CAUCHY-Typ) abgebildet, bei dem der Wasseraustausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser durch die Wasserstandsdifferenz und dem Leakagefaktor als hydraulischen Widerstandsfaktor beschrieben wird.

Als Ausgangswerte wurden die in dem Gutachten von BGS [U10] dokumentierten Leakagefaktoren angesetzt. Im Verlauf der Modellkalibrierung wurden diese angepasst. Hierbei ist aufgrund der Schwebstoffe im Fließgewässer von einer geringeren Infiltrationsrate aus dem Oberflächengewässer in das Grundwasser gegenüber der Exfiltration vom Grundwasser in das Fließgewässer auszugehen. Die Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser wird im Modell mit einem Leakage IN und die Exfiltration aus dem Grundwasser in das Oberflächengewässer mit dem Leakage OUT beschrieben. Der Leakagefaktor mit der Einheit von 1/s ergibt sich dabei aus der Durchlässigkeit der Leakageschicht durch die Dicke dieser Schicht.

Grundwasserentnahmen

Für die Modellkalibrierung 1996 bis 2005 wurden jeweils die Jahresmittelwerte der Entnahmen instationär angesetzt. Für das WW Dornheim wird anhand der vorliegenden Informationen eine einzelbrunnenbezogene Aufteilung der Entnahmen für die Brunnen 1 bis 4 sowie eine Brunnengruppenbezogene Verteilung für Br. 5 bis 8 und Br. 9 bis 11 angesetzt. Bei den sonstigen Entnahmen wird entsprechend den übergebenen Daten größtenteils vereinfacht eine Gleichverteilung der Entnahmen eines Betreibers auf alle Brunnen angenommen.

Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wurde in der Modellkalibrierung instationär als Jahresmittelwerte der Jahre 1996 bis 2005 als Randbedingung angesetzt.

Modellränder

Die Modellränder wurden gemäß hydrogeologischem Modell (vgl. **Kapitel 5.5.4**) umgesetzt und **Anlage 6.1** dargestellt.

6.2 Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells

Die Modellkalibrierung erfolgte instationär anhand der Grundwasserstandsentwicklung im Zeitraum 1996 bis 2005. Im Verlauf einer Kalibrierung wurden die aus dem hydrogeologischen Modell angesetzten Parameter (k_f -Werte, Leakagefaktoren) innerhalb einer plausiblen Bandbreite variiert, um eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Grundwasserstände zu erreichen. Für die Modellkalibrierung wurden gemessene Grundwasserstandszeitreihen an ausgewählten Messstellen zu Grunde gelegt (vgl. **Abbildung 6.2**). Die instationäre Kalibrierung wird anhand des Vergleiches der berechneten mit den gemessenen Grundwasserstandszeitreihen bewertet. Wie die Darstellungen in der **Anlage 6.2.1** und am Beispiel der Messstellen M 5339 (vgl. **Abbildung 6.3**) zeigen, sind die Abweichungen relativ gering. In Richtung zum Rhein schwanken die Messwerte deutlich stärker als die berechneten Grundwasserstände infolge des Modellansatzes mittlerer Rheinwasserstände. Hier können die Grundwasserstände im Mittel jedoch gut abgebildet werden.

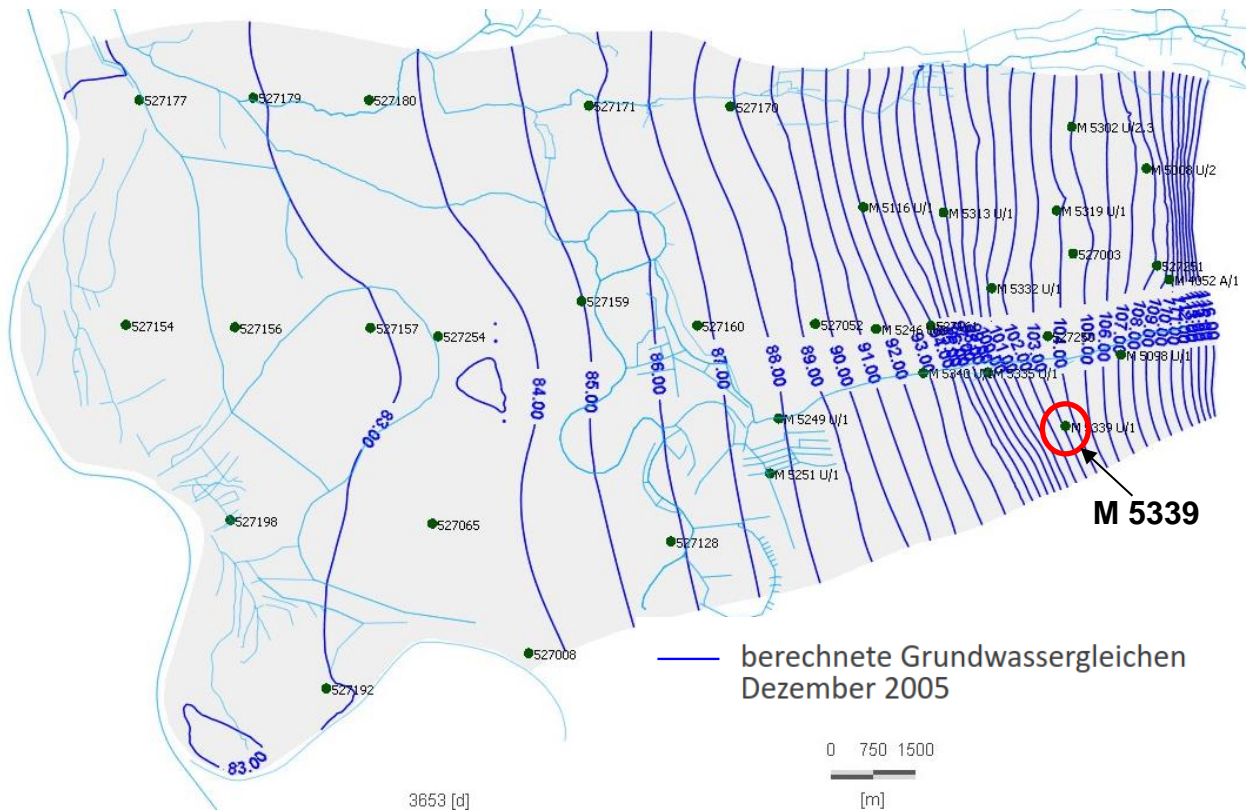


Abbildung 6.2 Referenz-Messtellen für die Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells

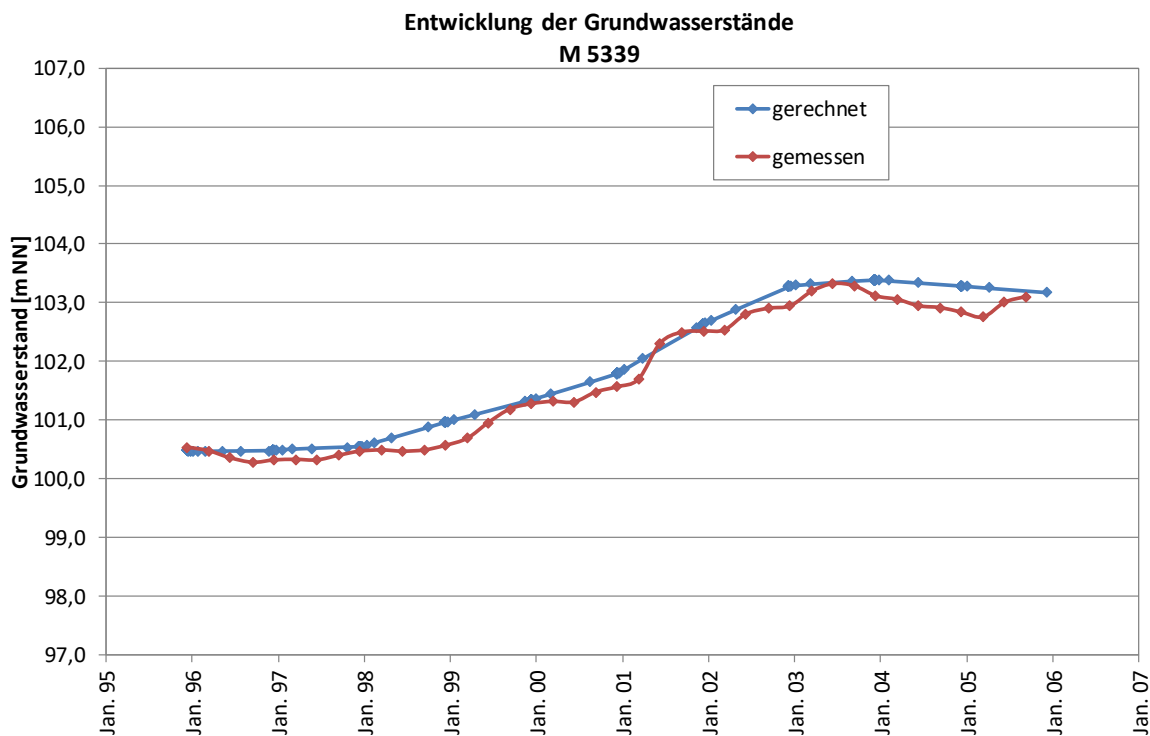


Abbildung 6.3 gemessene und berechnete Grundwasserstände, Messstelle M 5339

Die Ergebnisse der instationären Modellkalibrierung zeigen, dass das Modell die mittleren Strömungsverhältnisse in guter Näherung wiedergibt.

Die Grundwasserbilanz der aus dem Modell im Mittel über die einzelnen Jahre ein- und ausströmenden Wassermengen in der nachfolgenden **Tabelle 6.1** zeigt, dass der Wasserzufluss maßgeblich aus der Grundwasserneubildung (ca. 44 %) erfolgt. Weitere Anteile strömen über den Modellrand und aus den Oberflächengewässern zu. Ein Großteil des Grundwassers (ca. 85 %) wird über die Entnahmen abgeleitet und strömt über die Oberflächengewässer ab.

In den Jahren 2003 bis 2005 sowie 1996, 1997 übersteigen die Entnahmen die Grundwasserneubildung signifikant, während 1998 und 2001 bis 2002 ein positives Grundwasserdargebot (Grundwasserneubildung > Entnahmen) vorlag. Insgesamt war das Grundwasserbilanz im Kalibrierungszeitraum von 1996 bis 2005 in etwa ausgeglichen.

Tabelle 6.1 Mittlere Wasserbilanz für die Jahre 1996 bis 2005

Jahr	OUTFLOW [Mio. m ³ /a]					INFLOW [Mio. m ³ /a]					Differenz GWN - Entnahmen
	Entnahmen	Abfluss Gewässer	Modell- abstrom	Speicher	Gesamt	Grund- wasser- neubildung	Zufluss Gewässer	Modell- zustrom	Speicher	Gesamt	
1996	-16,7	-8,4	0,0	-1,0	-26,1	8,1	8,0	8,8	1,2	26,1	-8,6
1997	-16,6	-5,8	0,0	-0,7	-23,1	5,7	6,8	8,7	1,8	23,1	-10,9
1998	-14,8	-12,6	0,0	-10,6	-38,0	23,0	5,2	9,1	0,8	38,0	8,2
1999	-14,7	-14,8	0,0	-7,0	-36,5	14,6	12,1	9,2	0,5	36,4	-0,2
2000	-14,2	-20,1	0,0	-7,1	-41,5	24,4	7,0	9,4	0,7	41,4	10,2
2001	-15,3	-26,4	0,0	-11,2	-52,9	37,2	4,7	9,2	1,8	52,9	21,9
2002	-15,6	-23,8	0,0	-8,9	-48,2	30,6	4,8	9,2	3,7	48,2	15,0
2003	-16,3	-19,6	0,0	-2,4	-38,3	5,6	12,0	9,1	11,7	38,4	-10,7
2004	-13,8	-7,4	0,0	-1,4	-22,7	1,9	4,8	9,2	6,8	22,7	-11,9
2005	-13,7	-6,4	0,0	-0,4	-20,6	3,4	4,0	9,4	3,9	20,6	-10,4

Die aus der Modellkalibrierung resultierenden k_f -Wert-Verteilung der einzelnen Modellschichten sind in **den Anlage 6.3.1** bis **Anlage 6.3.4** dargestellt. Die kalibrierten Leakagefaktoren (hydraulischer Widerstandsfaktor siehe Kapitel 5.3) sind für die Gewässer wie folgt:

Tabelle 6.2 kalibrierte Leakage-Faktoren der Gewässer

Gewässer	Leakage IN [1/s]	Leakage OUT [1/s]
Darmbach/Landwehr	$1 \cdot 10^{-8}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
Landgraben Ost	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Landgraben Mitte	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Landgraben West	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Scheidgraben	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Hauptgraben, Stichgraben	0	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Schwarzbach	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Mühlgraben	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$

7 STOFFTRANSPORTMODELL

7.1 Modellaufbau und Randbedingungen

Auf der Grundlage des kalibrierten Grundwasserströmungsmodells wurde anschließend ein Stofftransportmodell für den Parameter Dikegulac aufgebaut, um die Dikegulac-Ausbreitung ausgehend von historischen Einträgen über Rieselfelder und ab 1966 über Einträge in den Darmbach zu berechnen.

Grundlage hierbei bildet eine instationäre Grundwasserströmung mit folgendem Ansatz (vgl. **Abbildung 7.1**):

- **Instationäre Jahresentnahmen** des WW Dornheim (Br. 1 bis 4 für Einzelbrunnen, Brunnengruppen 5-8 und 9-11)
- Instationärer Ansatz der sonstigen Entnahmen durch mehrjährige Mittel (vgl. **Abbildung 7.1**)
- Stationärer Ansatz der **sonstigen Randbedingungen als langjähriges Mittel** (Grundwasserneubildung, Wasserstand der Oberflächengewässer)

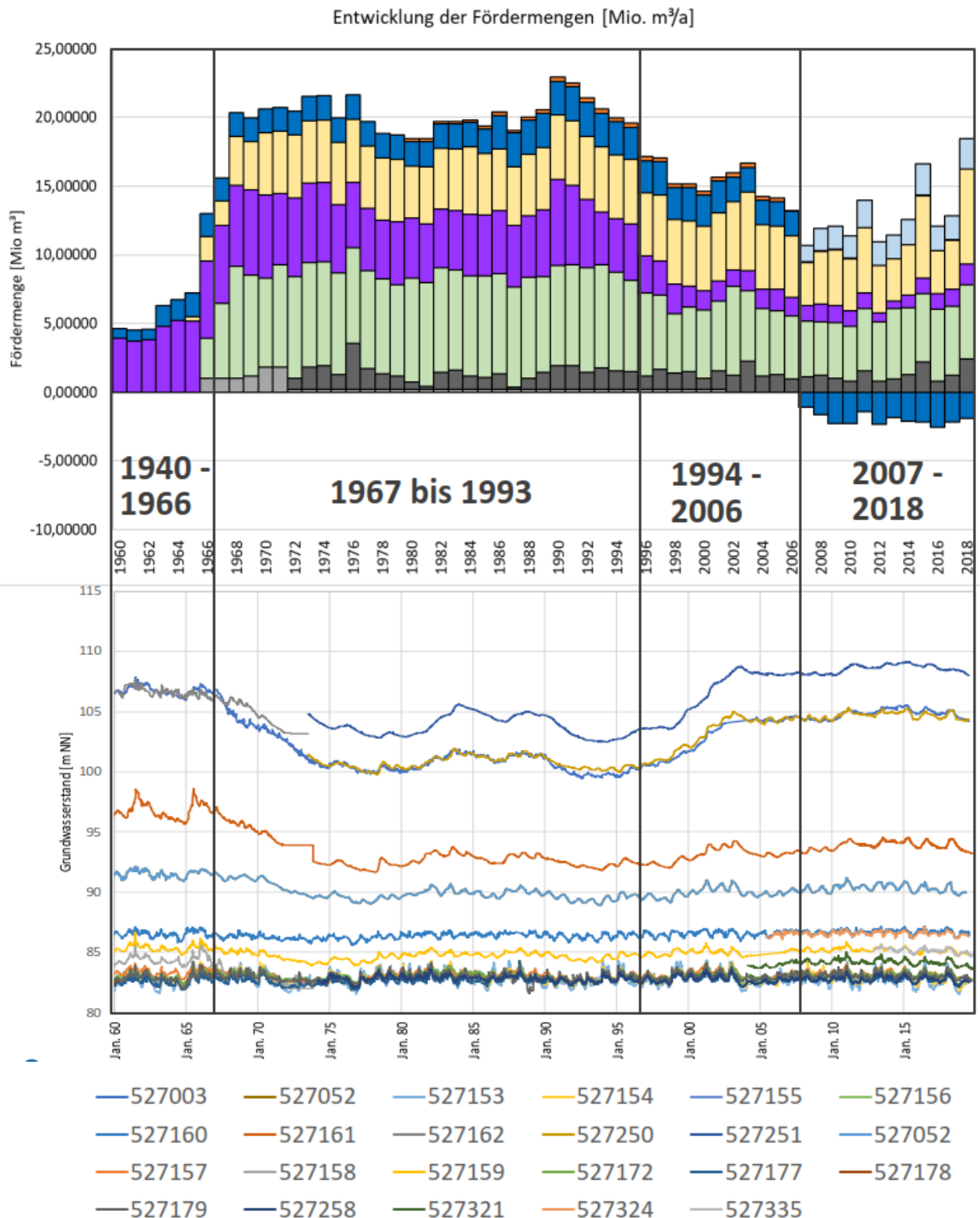


Abbildung 7.1 Instationärer Ansatz der Entnahmen im Transportmodell durch mehrjährige Mittel (vgl. auch Anlage 5.3.2 und Anlage 3.2)

In den Transportberechnungen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich der Parameter Dikegulac wie ein idealer Tracer, d.h. ohne Abbau und Retardation im Untergrund verteilt. Für den im Tracer-Transport maßgeblichen skalenabhängigen Parameter (Dispersivität) wurde ein Ansatz der longitudinalen Dispersivität von 50 m, der transversale Dispersivität von 10 m (im OZH von 5 m) gewählt. Hierbei wurde eine Skala des Stofftransportes aus den jeweiligen Eintragsflächen der Rieselfelder und des Darmbaches von etwa 5000 m zugrunde gelegt. Dies ergibt gemäß **Abbildung 7.2** eine longitudinale Dispersivität von ca. 40 bis 60 m.

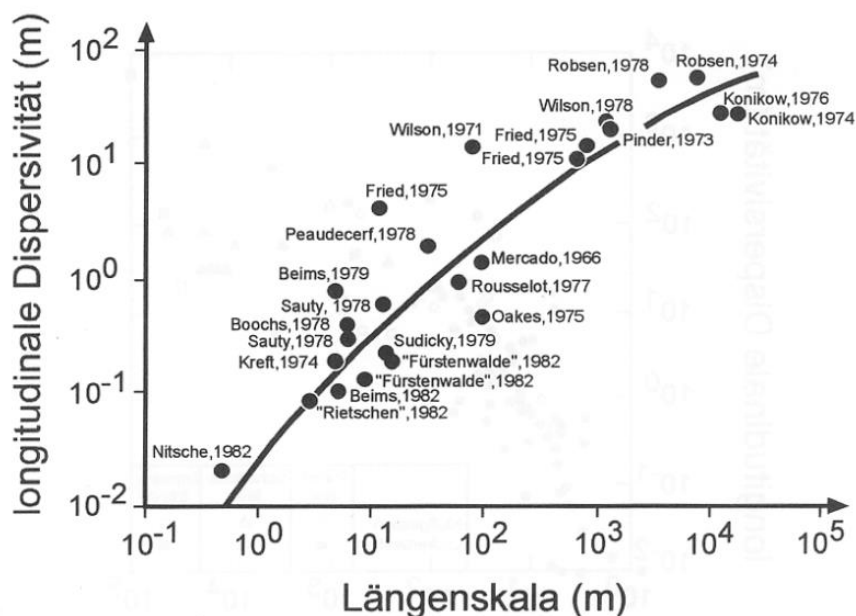


Abbildung 7.2 Skalenabhängigkeit der longitudinalen Dispersion [U12]

Die Stoffeinträge wurden instationär wie folgt angesetzt:

- a) 1940 bis 1965 Eintrag über Rieselfelder
- b) Ab 1966 Eintrag über den Darmbach/Landwehr

Eintrag über Rieselfelder:

Die Infiltrationsmengen über die Rieselfelder wurden gemäß den Angaben in [U11] wie folgt angesetzt:

Tabelle 7.1 Ansatz der Infiltrationsmengen über die Rieselfelder, zusammengefasst aus [U11]

Zeitraum	Rieselmenge [Mio. m ³ /a]	Verdunstung [Mio. m ³ /a]	Abfluss über Gräben [Mio. m ³ /a]	Eintrag als Infiltration netto [Mio. m ³ /a]
1940 - 1959	8,7 (1948/49)	2,6*	3,05*	3,05*
1960 - 1965	10	3	3,5	3,5

* Abschätzung aus Infiltration 1948/49

Nach Aussagen von Merck sind von 1938 bis 1965 ca. 615 t Dikegulac auf die Rieselfelder eingetragen worden. Dies entspricht – anteilig aus den Infiltrationsmengen gemäß **Tabelle 7.1** – ca. 21,3 t/a in den Jahren bis 1959 und 24,45 t/a von 1960 bis 1965. Diese werden im Modell als Randbedingung über die gesamte Fläche der Rieselfelder (ca. 920 ha) gleichverteilt angesetzt.

Eintrag über Darmbach:

In der **Abbildung 7.3** ist die zeitliche Entwicklung der DAG-Austräge im Ablauf der Kläranlage Merck in den Darmbach dargestellt. Dementsprechend stieg der DAG-Eintrag in den Darmbach von ca. 12 mg/l im Jahr 1966 bis Mitte der 80iger Jahre auf ca. 74 mg/l an. Ab 1990 sank dieser aufgrund der Abwasservorbehandlung auf unter 1 mg/l stark ab.

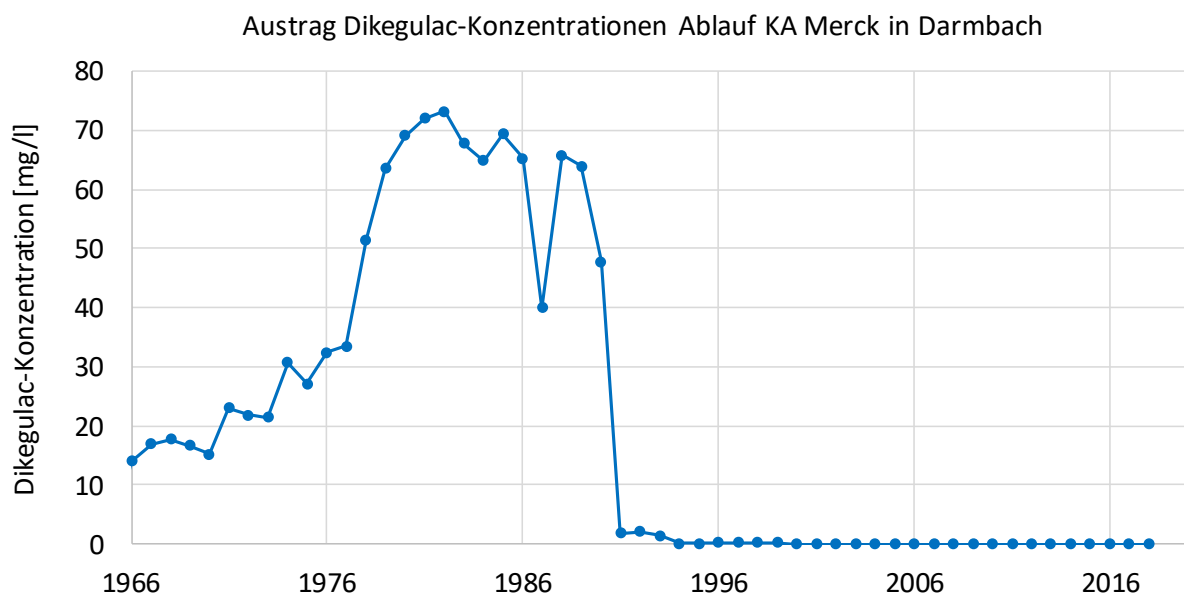


Abbildung 7.3 DAG-Austrag im Ablauf der Kläranlage Merck in den Darmbach

Der Eintrag über den Darmbach wurde als instationäre Massen-Fluss-Randbedingung angesetzt, die mit der entsprechenden Gewässer-Randbedingung am Darmbach/Landgraben-System gekoppelt ist. Hierbei wurde der gesamte Abfluss im Darmbach inklusive Zufluss der Kläranlage Darmstadt berücksichtigt. Demzufolge ergibt sich aus [U6] ein „Merck“-Abwasseranteil von:

- rd. 10,3% im Darmbach inklusive Zuflüsse einschließlich Kläranlage
- rd. 9,1% im Bereich Darmbach / Landwehr inklusive Zuflüsse Schlimmer Graben und Scheidgraben inklusive Oberlieger
- rd. 7,9% im Bereich Darmbach / Landwehr inklusive Zuflüsse an Mündung in den Schwarzgraben inklusive Oberlieger

Die DAG-Konzentrationen werden entsprechend des belasteten Abwasseranteils an den Abschnitten verdünnt angesetzt. Der Dikegulac-Austausch des Oberflächengewässers mit dem Grundwasser Q_{mass} wird über eine Masse-Leakage-Randbedingung abgebildet, bei dem der Konzentrationsaustausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser durch die Konzentrationsdifferenz dc , der Eintragsfläche A und einer Masse-Transferrate Φ [m/s] beschrieben wird:

$$Q_{mass} = A \cdot \Phi \cdot dc$$

Die entsprechenden Masse-Transferraten sind a priori nicht bekannt und wurden im Verlaufe der Kalibrierung so angesetzt, dass die gemessenen und berechneten Dikegulac-Konzentrationen bestmöglich übereinstimmen. Die im kalibrierten Masse-Transferraten bilden auch mögliche Stoffabbauprozesse mit ab, die derzeit nicht bekannt sind.

7.2 Berechnung der historischen Stoffausbreitung

Modellaufbau und Randbedingungen

Mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Randbedingungen wurde die instationäre Stoffausbreitung des Parameters Dikegulac ausgehend von den historischen Einträgen über die Rieselfelder und den Darmbach von 1940 bis 2019 berechnet.

Dabei zeigte sich, dass mit dem Ansatz der gesamten Einträge auf die Rieselfelder die tatsächlichen Dikegulac-Frachten, die in das Grundwasser gelangen, deutlich überschätzt werden. Es ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil der auf die Rieselfelder eingetragenen DAG-Fracht über die Pflanzen ausgetragen und/oder abgebaut wurde. Dieser Anteil ist aktuell nicht bekannt. In Literaturangaben gibt es Hinweise für einen Stoffabbau in der aeroben Zone. Ob DAG auch in der gesättigten Zone abgebaut wird, ist aktuell nicht bekannt. Vor dem Hintergrund dieser Unsicherheiten wird ein prozentualer Abschlag des Eintrages über die Rieselfelder in der Weise angesetzt, dass die berechneten Konzentrationen die gemessenen bestmöglich abbilden.

Dies wurde mit einem Eintrag von ca. 1% der Brutto-Fracht erreicht. Demzufolge ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil (99%) der über die Rieselfelder eingetragenen Dikegulac-Fracht abgebaut, über Fließgewässer abgeflossen oder über Pflanzen ausgetragen wurde.

Hierbei wurden die Transportparameter (Masse-Leakage-Faktoren) variiert, um eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Dikegulac-Konzentrationen zu erreichen. Im Bereich des Grabensystems Landwehr/Darmbach etwa 1 km im Oberlauf der Einmündung in den Landgraben wurde lokal der Masse-Leakage-Faktor erhöht (vgl. **Anlage 7.3**). Dies impliziert einen erhöhten Stoffeintrag aus dem Gewässer in das Grundwasser, um die steigenden Dikegulac-Konzentrationen im Abstrom an der Messstelle G52300 abzubilden. Genaue Lage und Ursache dieses lokal erhöhten Eintrages von Dikegulac in das Grundwasser ist nach aktuellem Kenntnis jedoch unbekannt und kann ebenso durch Retardation (abgelagertes und wieder gelöstes Dikegulac im Bereich der Rieselfelder) entstanden sein.

Vergleich berechneter und gemessener Dikegulac-Konzentrationen

In **Anlage 7.1** sind für die maßgeblichsten Grundwassermessstellen und Brunnen jeweils die berechneten im Vergleich zu den gemessenen Dikegulac-Konzentrationen über die Zeit dargestellt. Diese Darstellungen zeigen folgende Abweichungen:

- An einigen Messstellen (G52351 und G52250, WW Dornheim Br. 2) treten die berechneten Werte ca. 10 Jahre früher als die Messwerte ein. Dies kann auf Retardationsprozesse hinweisen. An G52250 werden zudem ca. 80 µg/l zu niedrige Werte berechnet.
- An den Brunnen Br. 4 und 5 wird ein höherer Durchgang der Dikegulac-Fahne ab ca. 2005 berechnet. Dies deutet darauf hin, dass die berechnete Fahne etwas schneller in tiefere Bereiche absickert.
- Sehr große Abweichungen liegen bis 1995 an der Messstelle N113 G511130 in unmittelbarer Nähe zum Landgraben (ca. 150 m Entfernung in Abstromrichtung) vor. Die Messwerte sind mit bis zu 10,5 mg/l erheblich höher als die max. Werte an anderen Messstellen im Untersuchungsgebiet. Unter Berücksichtigung, dass die Eintragsmenge in diesem Bereich nur max. 5 mg/l angesetzt wurde und zudem nur ein geringer Teil hiervon auch versickert, sind die hohen Befunde möglicherweise auf lokale „Kurzschlüsse“ (Bereiche deutlich höherer k_f -Werte) zurückzuführen, die im Modell nicht abgebildet werden.
- Am südlichsten Brunnen Br. 11 wurden seit 1989 Dikegulac-Konzentrationen von bis zu 50 µg/l gemessen. Demgegenüber wurden in diesem Bereich keine Fahne berechnet. Da nord- nordöstlich hiervon aktuell kein Hinweis auf Dikegulac-Befunde gibt, ist dies möglicherweise auf einen früheren sehr lokalen Eintrag von Dikegulac aus dem Scheidgraben zurückzuführen, der nicht im Modell abgebildet ist.

Insgesamt kann die Ausbreitung der Dikegulac-Fahne im Hinblick auf die abgeschätzten Annahmen bezüglich der Randbedingungen und Unsicherheiten (Lage der Rieselfelder, mehrjährige Entnahmemittel, langjähriges Mittel der Grundwasserneubildung) gut abgebildet werden. Dies

zeigt auch ein Vergleich der aktuell gemessenen und berechneten DMS-Konzentrationen für 2019 in **Anlage 7.2**.

Die Berechnungsergebnisse der historischen Stoffausbreitung wurden zudem in Form von Verteilungskarten für die Jahre 1990, 2005 und 2019 in **Anlage 8.1**, **Anlage 8.2** und **Anlage 8.3**, sowie als vertikale Stoffausbreitung an einer Schnittlinie entlang des Landgrabens in West-Ost-Richtung in **Anlage 8.4** dargestellt.

Bis zum Jahr 1990 ist der größte Teil der Gesamtfracht an Dikegulac in den Untergrund eingetragen worden und dementsprechend liegen hier sehr hohe Dikegulac-Konzentrationen im Nahbereich des Darmbaches bis ca. 5 mg/l vor. Die Fahne ausgehend vom Landgraben ist bisher etwa 500 m bis 2 km in Abstromrichtung transportiert worden.

Vertikal sickert die Dikegulac-Fahne im westlichen Bereich der Landgrabens bis 2005 kaum ab, da ein maßgeblicher Stofftransport hier von dem in diesem Bereich vorhandenen durchgehenden OZH verhindert bzw. stark eingeschränkt wird. Östlich der Brunnen des WW Dornheim ist jedoch kein OZH vorhanden, so dass die Stofffracht hier nahezu ungehindert absickert und somit den ganzen Horizont des GWL einnimmt. Ebenso ist der OZH unterhalb der Rieselfelder nicht vollständig und damit wirksam vorhanden, so dass die verrieselte Dikegulac-Fracht bis zur Basis des GWL absickert. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit bewegt sich die Fahne nur sehr langsam.

Bilanzierung der Dikegulac-Frachten

Abbildung 7.4 zeigt die Abschätzung der Gesamtbilanz bezüglich der Dikegulac-Frachten. Nach Recherchen von Merck ist von Beginn an (ca. 1940) bis heute eine Dikegulac-Gesamtfracht von ca. 7638 t in die Umwelt eingetragen worden, hiervon:

- über Rieselfelder: ca. 615 t (Zeitraum bis 1965)
- in den Darmbach: ca. 7023 t (Zeitraum 1966 bis heute)

Hiervon ist nur ein Teil tatsächlich in das Grundwasser gelangt. Im Gewässersystem Darmbach/Landgraben wird im Grundwassermodell der Anteil der Dikegulac-Konzentrationen berechnet, der in das Grundwasser gelangt oder aus diesem ausgetragen wird. Über die Gewässer-Randbedingung inklusive Leakagefaktoren werden diese Prozesse abgebildet. Die restliche Fracht im Gewässersystem strömt im Modell direkt in den Rhein ab. Für den Anteil, der über die Rieselfelder eingetragenen Stofffracht, der abgebaut und über die Pflanzen ausgetragen wird und nicht ins Grundwasser gelangt, wird gemäß den Ausführungen in **Kapitel 7.2** ein Abschlag im Modell angesetzt.

Die Massebilanzen für Dikegulac wurden jeweils für die folgenden zwei relevanten Zeiträume berechnet:

- Zeitraum 1940 bis 1965 – während des Rieselbetriebes (vgl. **Tabelle 7.2**)
- Zeitraum 1966 bis 2019 – nach dem Rieselbetrieb (vgl. **Tabelle 7.3**)

Die Bilanzierung der Dikegulac-Frachten für die relevanten Zeiträume sind in den nachfolgenden **Tabelle 7.2** (Zeitraum während des Rieselbetriebes) sowie in **Tabelle 7.3** (Zeitraum nach dem Rieselbetrieb) zusammengestellt.

Tabelle 7.2 Gesamtbilanz der Dikegulac-Fracht 1940 bis 1965 (während des Rieselbetriebes)

Bilanzgrößen	Eintrag [t]	Austrag [t]
Eintrag über Rieselfelder in die Umwelt	+ 615	0
Austrag über Pflanzen/Stoffabbau	0	- 605
Ein-/Austrag über Gewässer in/aus Grundwasser	0	0
Austrag über Brunnen WW Dornheim	0	0
Austrag über sonstige Brunnen	0	0
Gesamt	+ 615	- 605

Tabelle 7.3 Gesamtbilanz der Dikegulac-Fracht 1966 bis 2019 (nach dem Rieselbetriebes)

Bilanzgrößen	Eintrag [t]	Austrag [t]
Eintrag über Gewässer in die Umwelt	+ 7023	0
Austrag über Gewässer in den Rhein	0	- 6902
Austrag über Gewässer aus dem Grundwasser	0	- 32
Austrag über Brunnen WW Dornheim	0	- 3
Austrag über sonstige Brunnen	0	- 2
Gesamt	+ 7023	- 6939
Gesamt 1940 - 1965	+ 7638	- 7544
Differenz Gesamt Eintrag - Austrag	+ 94¹⁾	

1) Entspricht der verbliebener Dikegulac-Fracht im Untergrund

Demnach wurden ca. 615 t über Rieselfelder und ca. 7.023 t Dikegulac in die Umwelt eingetragen. Hiervon wurden ca. 6.934 t (6.902 t + 32 t) bereits über das Gewässersystem und ca. 5 t über Grundwasserentnahmen wieder aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen. Weitere Anteile (ca. 605 t) wurden über Pflanzen und Stoffabbauprozesse gebunden. In der Gesamtbilanzierung Eintrag minus Austrag (vgl. **Tabelle 7.3**) ergibt sich, dass aktuell noch 94 t Dikegulac im Untergrund vorhanden sind. Dies sind ca. 1 % des insgesamt über das Abwasser der Firma Merck ausgetragenen Dikegulacs. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht dies.

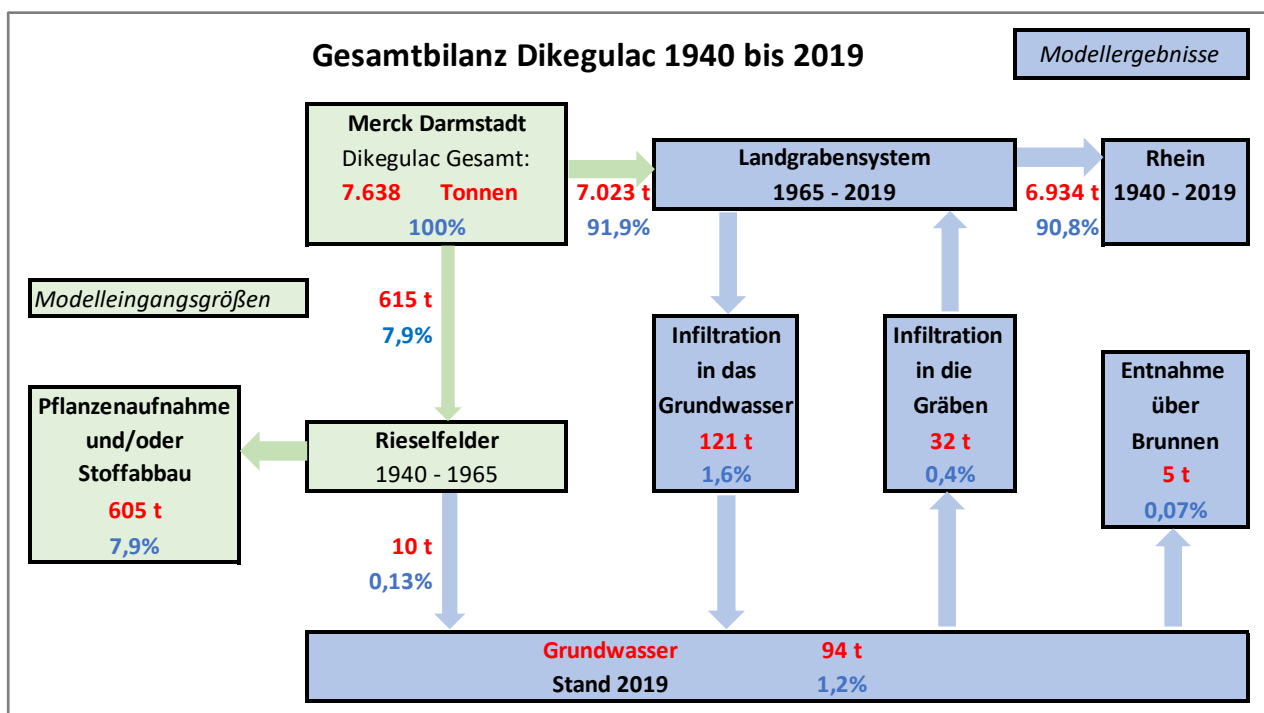


Abbildung 7.4 Abschätzung der Gesamtfrachten an DAG am Standort im Zeitraum 1940 bis 2019

Die kalibrierten Masse-Transferraten (siehe Kapitel 7.1) sind für das relevante Gewässersystem Darmbach/Landgraben in **Anlage 7.3** dargestellt.

7.3 Bewertung der historischen Stoffausbreitung

Die Ergebnisse der berechneten Dikegulac-Ausbreitung von 1940 bis zum aktuellen Zeitpunkt zeigen Folgendes:

- Die bis 1965 auf die Rieselfelder eingetragenen Dikegulac-Frachten sind nur zu einem geringen Teil (ca. 2%) bis ins Grundwasser gelangt. Dies zeigen sowohl die historischen und aktuellen Dikegulac-Konzentrationen an den Messstellen im Abstrom der Rieselfelder als auch die Modellrechnungen. Der überwiegende Anteil der eingetragenen Fracht

ist demnach nicht ins Grundwasser gelangt und wurde von Pflanzen gebunden und durch Stoffabbau verringert. Die Anteile dieser einzelnen Prozesse an der Gesamtfracht können nach aktueller Kenntnislage nicht im Einzelnen bewertet werden.

- Derzeit sind keine maßgeblichen DAG-Konzentrationen > 50 µg/l im Bereich und im Abstrom der Rieselfelder vorhanden. Die im Abstrom der Rieselfelder aktuell vorhandene DAG-Fahne mit Höchstkonzentrationen bis ca. 38 µg/l wird sich künftig etwas weiter verdünnen und in Richtung Rhein abströmen. Die Dikegulac-Fahne aus den Rieselfeldern hat sich aufgrund des lückenhaften OZH in diesem Bereich über die gesamte Tiefe des GWL ausgebreitet.
- Maßgebliche Dikegulac-Frachten sind bis in die 1990iger Jahre demgegenüber aus dem Gewässersystem Darmbach/Landwehr/Landgraben über Infiltration in das Grundwasser gelangt. Dies Fahne bewegt sich sehr langsam in Strömungsrichtung in Richtung zum Rhein und den lokalen Grundwasserbrunnen. Direkt in der Nähe des Landgrabens sinken sowohl die berechneten als auch die gemessenen DAG-Konzentrationen derzeit bereits, während sie weiter stromabwärts noch ansteigen.
- Die höchsten Dikegulac-Befunde im Gesamtzeitraum lagen in den 1990iger Jahren vor. Im Jahr **1990** ist das Maximum der DAG-Konzentrationen im Abstrom des Grabensystems mit folgenden Höchstwerten zu verzeichnen:
 - Nahbereich Landgraben/Schwarzbach: 2800 µg/l
 - Nordöstlich WW Dornheim: 750 µg/l
 - Abstrom Landgraben Höhe WW Dornheim: 600 µg/l
- Im Jahr **2005** sind die Dikegulac-Konzentrationen insbesondere im Nahbereich des Landgrabens deutlich zurückgegangen. Die maximalen DAG-Konzentrationen lagen im Abstrom des Grabensystems mit folgenden Höchstwerten vor:
 - Nahbereich Landgraben/Schwarzbach 550 µg/l
 - Nordöstlich WW Dornheim: 420 µg/l
 - Abstrom Landgraben Höhe WW Dornheim: 400 µg/l
- Aktuell (**2019**) sind die DAG-Befunde weiter zurückgegangen. Das Maximum der DAG-Konzentrationen im Abstrom des Grabensystems sind mit folgenden Höchstwerten zu verzeichnen:
 - Nahbereich Landgraben/Schwarzbach 340 bis 400 µg/l
 - Nordöstlich WW Dornheim: 350 µg/l
 - Abstrom Landgraben Höhe Dornheim: 340 µg/l

8 PROGNOSE DER ZUKÜNFTIGEN STOFFAUSBREITUNG

8.1 Modellaufbau und Randbedingungen

Das kalibrierte Stofftransportmodell wurde anschließend eingesetzt, um die künftige Dikegulac-Ausbreitung bis 2050 zu berechnen.

Grundlage hierbei bilden die aktuellen stationären Grundwasserströmungs-Randbedingungen (vgl. Kapitel 7.1) mit einer an zukünftige klimatische Verhältnisse angepassten Grundwasserneubildung. Hierfür wurde vom HLNUG das aktuelle langjährige Mittel 2003 bis 2018 zur Verfügung gestellt. Seit 2000 (zurückliegende 20 Jahre) fehlen typische „nasse“ Jahre, so dass dieses langjährige Mittel geeignet ist, die kommenden Zeiträume mit tendenziell trockeneren Bedingungen abzubilden.

Die mittlere Grundwasserneubildung 2003 bis 2018 liegt im Modellgebiet im Mittel bei ca. 41,1 mm/a bzw. ca. 1,3 l/s km² und damit um ca. 44 % niedrigere Grundwasserneubildung gegenüber dem früheren Mittel. Für die Gesamtfläche des Modellgebietes ergibt sich ein Gesamtzustrom über Grundwasserneubildung von ca. 7,9 Mio. m³/a.

Die Transportparameter und Randbedingungen wurden gemäß des kalibrierten Stofftransportmodells, die in Kapitel 7.1 beschrieben sind, angesetzt. Für den Eintrag über den Darmbach wurden hierbei für die Prognosen die aktuellen Werte (Eintrag 2018) stationär bis 2050 angesetzt. Dies entspricht einer Ablaufkonzentration der Kläranlage Merck von 2 µg/l.

8.2 Prognose der zukünftigen Dikegulac-Ausbreitung

In den nachfolgenden Abbildungen (vgl. **Abbildung 8.1** und **Abbildung 8.2**) werden die Entwicklung der Dikegulac-Ausbreitung aktuell (2019) und im Jahr 2050 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der Prognoserechnungen sind in Form von Verteilungskarten in **Anlage 9.1** (2025), **Anlage 9.2** (2035) und **Anlage 9.3** (2050) sowie als vertikale Stoffausbreitung an einer Schnittlinie entlang des Landgrabens in West-Ost-Richtung **Anlage 9.4** dem Bericht beigelegt.

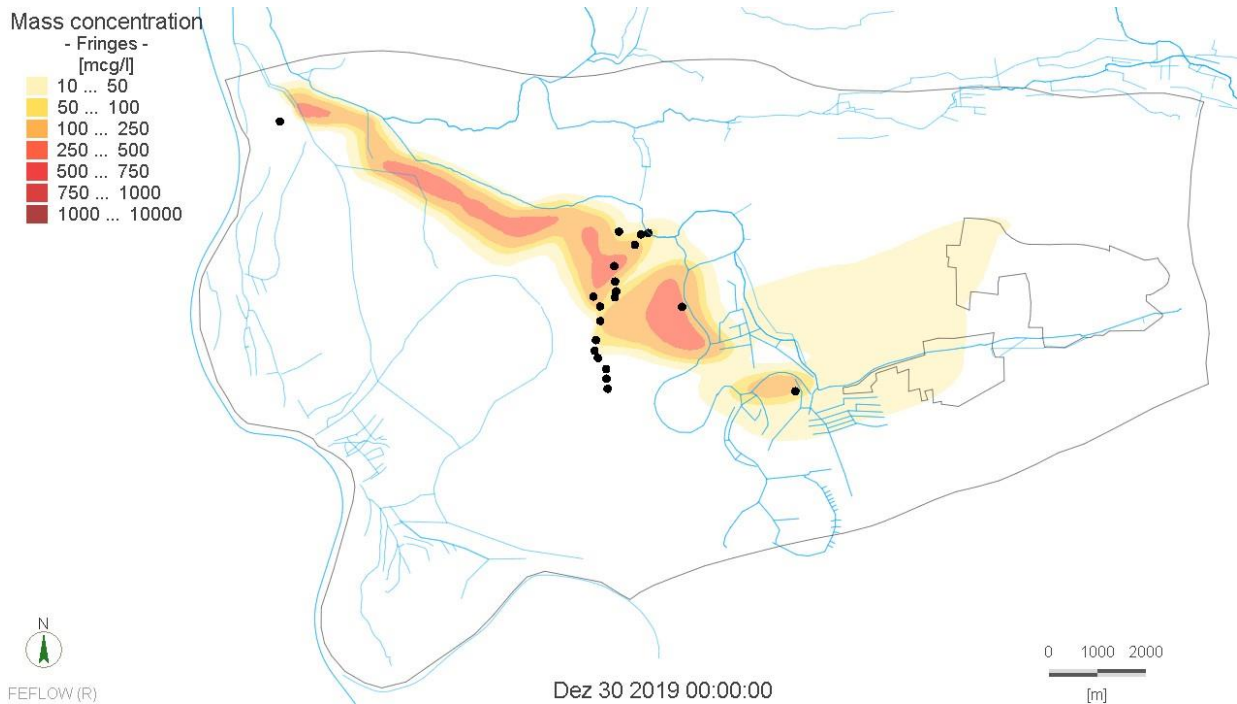


Abbildung 8.1 Berechnete Dikegulac-Konzentrationen 2019 in $\mu\text{g/l}$

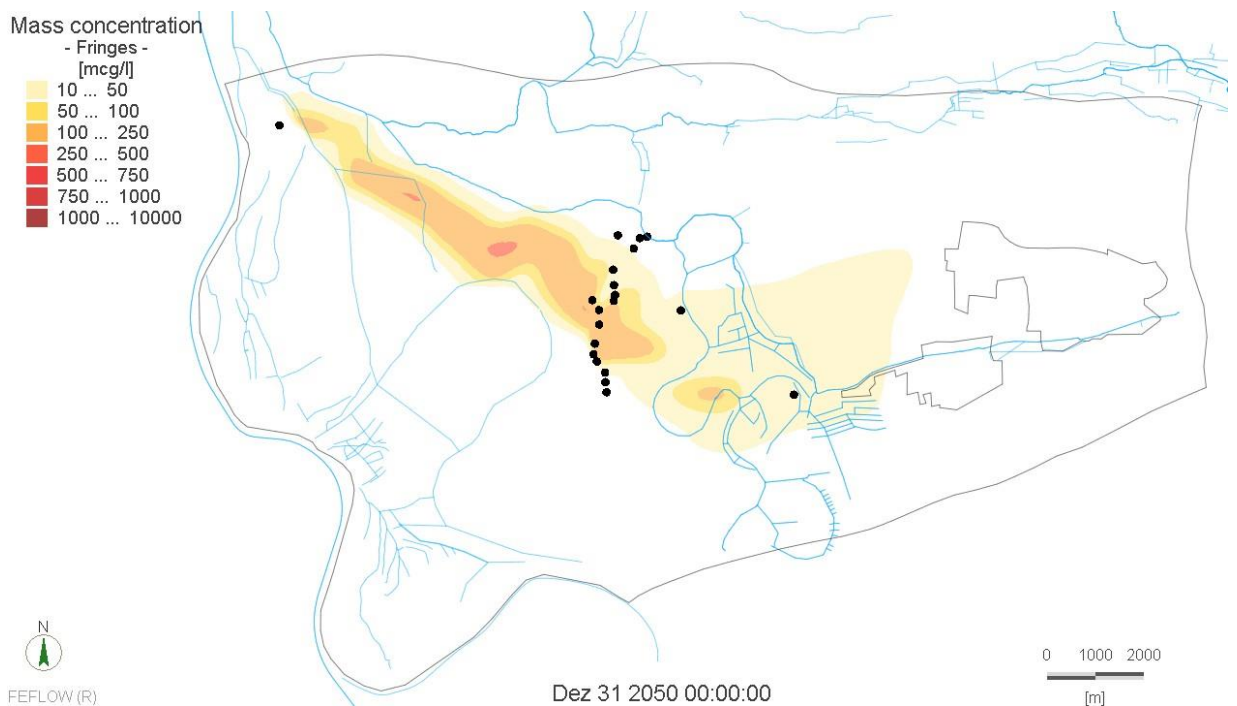


Abbildung 8.2 Berechnete Dikegulac-Konzentrationen 2050 in $\mu\text{g/l}$

Die Ergebnisse der berechneten Dikegulac-Prognose vom aktuellen Zeitpunkt bis 2050 zeigen Folgendes:

- Bis 2050 wird die Dikegulac-Fahne ca. 500 bis 1500 m weiter in Strömungsrichtung abströmen. Aufgrund des geringen Grundwassergefälles bewegt sich die Fahne vergleichsweise nur langsam weiter. Dies wird durch künftig „trockenere“ Verhältnisse mit geringerer Grundwasserverhältnisse noch weiter verstärkt.
- Die Dikegulac-Fahne wird sich lokal von aktuell bis 500 µg/l auf max. 250 µg/l weiter verdünnen. Im Bereich der Brunnen 4 bis 8 des Wasserwerkes Dornheim werden bis 2050 Dikegulac-Konzentrationen bis 250 µg/l erwartet. Da zwischen Landgraben und Wasserwerksbrunnen kein maßgeblicher Trennhorizont vorhanden ist, wird sich die Fahne in diesem Bereich über den gesamte Grundwasserleiter erstrecken.
- Voraussichtlich erst deutlich nach 2050 wird die Fahne den Einzugsbereich des WW Dornheim verlassen und mit weiterer Verdünnung in Richtung Rhein abströmen.
- Auch im Jahr 2050 liegen nach aktuellen Berechnungen noch signifikante Dikegulac-Konzentrationen bis 250 µg/l im Grundwasser vor. Die Hauptfahne wird sich westlich des Landgrabens bis hin zu den Brunnen des WW Dornheim erstrecken. Östlich der Brunnen des WW Dornheim bis zum Rhein werden in tieferen Bereichen keine Dikegulac-Konzentrationen über 50 µg/l erwartet, im OGWL liegen bereichsweise noch Werte bis 100 µg/l vor.
- Im Prognosezeitraum (2019 bis 2050) würden, unter Beibehaltung der aktuellen (2019) Entnahmebedingungen, 18 t Dikegulac über Brunnen und 2 t über Gewässer aus dem Grundwasser ausgetragen und ca. 1 t über das Grabensystem (Gewässer) in das Grundwasser eingetragen.
- Somit sind im Jahr 2050 nach den vorliegenden Prognoseberechnungen noch ca. 75 t Dikegulac im Grundwasser des Untersuchungsgebiets vorhanden.

CDM Smith Consult GmbH
2020-09-30

ppa.



Dr.-Ing. Klaus Piroth
Geschäftsbereichsleiter

erstellt:

i.V.



Dr.-Ing. Bettina Starke
Projektleiter

i.A.



Dr. Christina Haberer
Projektingenieur