

Grundwassermodell Karlsruhe - Worms



Analyse und Prognose der TFA-Belastung im Rhein-Neckar-Raum
Stand Dezember 2018



Baden-Württemberg

Grundwassermodell Karlsruhe - Worms



Analyse und Prognose der TFA-Belastung im Rhein-Neckar-Raum
Stand Dezember 2018

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe Referat 42 - Grundwasser Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH Heßbrühlstr. 21 70565 Stuttgart
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe Referat 42 - Grundwasser
BEZUG	Der Bericht ist als pdf-Download im Bestellshop der LUBW unter https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/publikationen erhältlich.
STAND	Dezember 2018

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



VORBEMERKUNG	5
ZUSAMMENFASSUNG	6
1 EINLEITUNG	8
1.1 Aufgabenstellung	8
1.2 Ziele	9
2 HYDROGEOLOGIE	10
2.1 Untersuchungsgebiet	10
2.2 Hydrogeologische Einheiten	12
2.3 Hydrogeologische Eigenschaften	13
3 TRIFLUORACETAT (TFA)	15
3.1 Transporteigenschaften	15
3.2 Gesundheitlicher Orientierungswert und Maßnahmenwert	15
3.3 TFA-Konzentrationen im Neckar	16
4 MODELLAUFBAU	17
4.1 Modellgebiet, horizontale Differenzierung und Randbedingungen	17
4.2 Vertikale Differenzierung	19
4.3 Betrachtungszeitraum und zeitliche Differenzierung	20
4.4 Grundwasserneubildung im Rhein-Neckar-Raum	21
4.5 Randbedingung der Oberflächengewässer	21
4.6 Entnahmen im Rhein-Neckar-Raum	22
5 MODELLKALIBRIERUNG DER GW-STRÖMUNG	24
5.1 Stationäre Grundwasserstände	24
5.2 Stationäre Grundwasserbilanz	26
5.3 Instationäre Grundwasserstände	27
5.4 Instationäre Grundwasserbilanz	32
6 ÜBERPRÜFUNG DER KALIBRIERUNG ANHAND VON CHLORIDDATEN UND ANALYSE NECKARUFERFILTRAT	37
6.1 Chlorideintrag	37

6.2	Chloriddtransport	38
6.3	Analyse der Ausbreitung von Neckaruferfiltrat	42
7	TFA-TRANSPORT	52
7.1	TFA-Eintrag über den Neckar	52
7.2	TFA-Ganglinien	52
7.3	TFA-Verteilungen	62
7.4	TFA-Bilanzen	65
8	SENSITIVITÄTSANALYSE DER TRANSPORTPARAMETER	68
8.1	Durchflusswirksamer Hohlraumanteil	68
8.2	Dispersivitäten	68
9	SENSITIVITÄTSANALYSE MIT LOKAL VERFEINERTEM MODELL	75
9.1	Modellaufbau	75
9.2	Grundwasserströmung	76
9.3	TFA-Transport	77
10	PROGNOSE DER TFA-VERHÄLTNISSE	82
10.1	Definition der Szenarien für den TFA-Eintrag in den Neckar	82
10.2	Stochastische Generierung der hydrologischen Verhältnisse	82
10.3	TFA-Ganglinien	84
10.4	Sensitivitätsbetrachtung zum Hohlraumanteil	92
10.5	Sensitivitätsbetrachtung zur Dispersivität	94
10.6	TFA-Verteilungen	95
10.7	TFA-Bilanzen	99
11	LITERATUR UND QUELLEN	100
12	ABBILDUNGEN UND TABELLEN	101

Vorbemerkung

Im Herbst 2016 wurden von der LUBW im Rahmen einer durch das Technologiezentrum Wasser TZW in Karlsruhe veranlassten Messung erhöhte Trifluoracetat-Konzentrationen im Neckar festgestellt. Als wesentliche Quelle der erhöhten Konzentrationen wurde eine industrielle Abwassereinleitung im Raum Bad Wimpfen identifiziert. Ein dort ansässiger Betrieb der chemischen Industrie produziert in Bad Wimpfen u.a. organische und anorganische Fluorchemikalien. Seit Herbst 2016 konnte die industrielle Einleitung von TFA durch sukzessiv umgesetzte prozessintegrierte Maßnahmen im betroffenen Betrieb um über 90 % reduziert werden.

Trifluoracetat (TFA) ist sehr gut wasserlöslich, mobil und persistent. Die Toxizität von TFA für den Menschen und für aquatische Organismen wird als gering eingeschätzt. Allerdings ist die Datenlage zu TFA noch unvollständig.

Aufgrund der Infiltration des Neckars gelangt TFA auch in das Grundwasser und damit in den Bereich der Wassergewinnungen im unteren Neckarraum. Dieser Zusammenhang besteht für alle Inhaltsstoffe des Neckars mit vergleichbaren Eigenschaften.

Die Bewertung von TFA im Trinkwasser hinsichtlich seiner gesundheitlichen Wirkung erfolgt durch das Umweltbundesamt (UBA). Der gesundheitliche Orientierungswert (GOW) wurde aufgrund vorliegender toxikologischer Daten auf 3 µg/l festgelegt. Hinsichtlich des Schutzniveaus „menschliche Gesundheit“ bewegt sich der GOW im Vorsorgebereich. Der derzeit gültige Maßnahmenwert für TFA wurde vom UBA auf 30 µg/l festgelegt. Bei einer Überschreitung des derzeit gültigen Maßnahmenwertes – die in den Wassergewinnungen im unteren Neckarraum nicht vorlag – werden trinkwasserhygienische Maßnahmen getroffen, es besteht aber keine Gesundheitsgefährdung, solange der GOW nach 10 Jahren wieder eingehalten wird. Seit Februar 2018 wird zur Vervollständigung der Datenbasis durch ein akkreditiertes Institut eine chronische Toxizitätsstudie durchgeführt. Das UBA geht davon aus, dass bis zum Herbst 2019 ein aus der genannten Studie abgeleiteter Trinkwasser-Leitwert für TFA festgelegt werden kann. Die Erforderlichkeit von Maßnahmen zum Schutz des Trinkwassers ergibt sich in der Folge aus diesem verbindlichen Leitwert.

Darüber hinaus erfolgt derzeit eine Vervollständigung der stofflichen Bewertung von TFA im Rahmen der Europäischen Chemikalienverordnung REACH. Hierzu wurden durch die Europäische Chemikalienagentur ECHA weitere Toxizitätsstudien zur aquatischen Toxizität und Humantoxizität von Trifluoracetat nachgefordert.

Zusammenfassung

Über das Uferfiltrat des Neckars gelangten in der Vergangenheit erhöhte Konzentrationen an Trifluoracetat (TFA) in den Grundwasserleiter des Rhein-Neckar-Raumes. Da dieser Grundwasserleiter auch zu Trinkwasserzwecken genutzt wird, sind erhöhte Konzentrationen an TFA auch an Trinkwasserbrunnen beobachtet worden. Um die TFA-Verhältnisse im Grundwasserleiter quantifizieren zu können, wurde das bestehende großräumige Grundwassermodell Karlsruhe – Worms verwendet und im Hinblick auf die Simulation des TFA-Transports auf Grund von Infiltration aus dem Neckar weiterentwickelt.

Zunächst wurde das Strömungsmodell im Rhein-Neckar-Raum hinsichtlich der Nachbildungsgüte der gemessenen Grundwasserstände überprüft. Hierzu erfolgte eine weitergehende Kalibrierung insbesondere der Leakagekoeffizienten des Neckars und der neckarnahen Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters. Mit diesem kalibrierten Strömungsmodell liegt eine plausible Nachbildung der Strömungsverhältnisse zwischen 1970 und 2016 vor, wobei die hydrologischen Randbedingungen auf Monatsbasis variieren. Mit dem Modell werden sowohl die saisonalen Variationen des Grundwasserstands als auch die mehrjährigen Schwankungen erfasst. Insbesondere die Schwankungen auf Grund der variierenden Neckarabflüsse und damit der Austauschvorgänge sind im Modell abgebildet.

Um die Fragestellungen im Hinblick auf den TFA-Transport bearbeiten zu können, erfolgte eine Überprüfung des Strömungsmodells anhand von im Grundwasser vergleichsweise zahlreich vorliegenden Chloridmessungen. Der Neckar hat bis Ende 1993 eine deutlich höhere Chloridkonzentration aufgewiesen als in den Jahren danach. Dieser signifikante Unterschied lässt sich auch in den Grundwassermessstellen beobachten. Im Rahmen der Modellüberprüfung anhand von Chlorid wurde der durchflusswirksame Hohlraumanteil zwischen 10 % und 20 % variiert. Neckarnah konnten die besten Anpassungen mit Hohlraumanteilen von 15 – 20 % erzielt werden, wobei die Unterschiede vergleichsweise gering sind, so dass für die weitere TFA-Betrachtung eine Bandbreite angesetzt wurde.

Um die Auswirkungen von TFA-belastetem Neckarwasser auf das Grundwasser im Rhein-Neckar-Raum zu analysieren, wurde in der Simulation das Neckarwasser markiert und im numerischen Modell die Ausbreitung des Uferfiltrats im Grundwasserleiter berechnet. Es wurden Modellbetrachtungen mit kontinuierlicher Markierung des Neckarwassers durchgeführt, um den Anteil an Infiltrationswasser aus dem Neckar an den Brunnen der Wasserversorgung zu bestimmen. Zusätzlich wurde untersucht, wie sich eine kurzfristige, quasi stoßartige Markierung im Grundwasserleiter ausbreitet, um die Laufzeiten zwischen Neckar und Entnahme zu bestimmen sowie Anhaltswerte zur Verdünnung von Konzentrationsspitzen an TFA im Neckar zu erhalten. Diese Auswertung hat gezeigt, dass an neckarnahen Brunnen Änderungen von Wasserinhaltsstoffen im Neckar innerhalb von ein bis drei Jahren beobachtet werden können. Bei neckarfernen Standorten ist mit Reaktionszeiten von über 10 Jahren zu rechnen. Andererseits haben die neckarnahen Entnahmen einen Anteil von bis zu 90 % an Neckaruferfiltrat. Bei neckarfernen Standorten wird lokale Grundwasserneubildung aus Niederschlag zugemischt und der Neckarwasseranteil liegt dann bei 20 bis 50 %.

Mit Hilfe des kalibrierten und anhand von Chloriddaten geprüften Grundwassermodells wurde der TFA-Transport im Grundwasser zwischen 1999 und 2016 betrachtet. Dabei konnten die gemessenen Größenordnungen der TFA-Konzentrationen in den Entnahmebrunnen der Wasserversorgungsunternehmen (WVU) mit

einer Abschätzung der vergangenen TFA-Frachten im Neckar nachgebildet werden, die in der Bandbreitenbetrachtung an der oberen Spannweite liegt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Prognoseberechnungen durchgeführt. Damit sollte einerseits abgeschätzt werden, wann und in welcher Höhe die TFA-Belastung die Brunnen der WVU erreicht. Weiter sollte die notwendige Reduktion der TFA-Belastung im Neckar abgeschätzt werden, damit an den Brunnen der WVU der aktuelle gesundheitliche Orientierungswert (GOW) von $3 \mu\text{g/l}$ im Rohwasser langfristig eingehalten werden kann.

Die Prognosebetrachtungen wurden bis 2050 durchgeführt, wobei ein stochastischer Ansatz für die Abschätzung der hydrologischen Verhältnisse in der Zukunft, in Bezug auf lokale Grundwasserneubildung aus Niederschlag und Neckarabfluss, gewählt wurde. Dabei wurde die hydrologische Situation der vergangenen Jahre seit 1999 verwendet, um mit zufälliger Aneinanderreihung der historischen Jahre für den Prognosezeitraum Zeitreihen zu generieren. Für diese hydrologischen Prognoseensembles wurden 5 verschiedene TFA-Eintragsszenarien in den Neckar vorgegeben.

Bei Szenario 1 wird von keiner weiteren TFA-Emission durch punktuelle Abwassereinleitung in den Neckar ausgegangen, im Neckar liegt dann lediglich die aus diffusem Eintrag herrührende Hintergrundbelastung von $1 \mu\text{g/l}$ vor. Im Szenario 2 liegt die langfristige Emission bei $0,5 \text{ kg/h}$, im Szenario 3 bei $0,8 \text{ kg/h}$, im Szenario 4 bei $2,0 \text{ kg/h}$ und im Szenario 5 bei $4,3 \text{ kg/h}$, woraus sich die entsprechenden TFA-Konzentrationen im Neckar in Abhängigkeit von den Abflussverhältnissen ergeben.

Die Prognoserechnungen haben folgendes gezeigt:

- Für neckarnahe WV-Brunnen mit hohem Uferfiltratanteil ist nach den aktuellen Modellierungsergebnissen eine eingeleitete TFA-Fracht gemäß Szenario 2 einzuhalten, um langfristig eine TFA-Konzentration von $3 \mu\text{g/l}$ unterschreiten zu können.
- Bei neckarfernen Brunnen kann ein mittelfristiger Anstieg der TFA-Konzentrationen nicht ausgeschlossen werden. Die Prognosen zeigen, dass auch hier eine Konzentration von $3 \mu\text{g/l}$ anhaltend überschritten und teilweise ein Wert von $10 \mu\text{g/l}$ erreicht wird. Die Überschreitungen werden geringer sein, aber länger andauern (bis zu einer Größenordnung von 15 Jahren) als bei den Brunnen in Neckarnähe.
- Bei den Szenarien 1 bis 3 unterschreiten die TFA-Konzentrationen neckarferner WV-Brunnen langfristig eine Konzentration von $3 \mu\text{g/l}$.

1 Einleitung

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Seit Herbst 2016 ist bekannt, dass über den Neckar erhöhte Konzentrationen an TFA in den Grundwasserleiter eingetragen wurden. Dies resultiert insbesondere aus einer industriellen Abwassereinleitung in den Neckar im Raum Bad Wimpfen. Im Herbst 2016 wurden mehrere Brunnen von Wasserversorgungsunternehmen (WVU) im Rhein-Neckar-Raum auf TFA untersucht, die im quartären Kiesgrundwasserleiter des Oberrheingrabens liegen. Es hat sich herausgestellt, dass im Bereich des Uferfiltrats des Neckars die TFA-Konzentrationen so hoch sind, dass diese teilweise den aktuellen gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) von $3 \mu\text{g/l}$ und an einigen neckarnahen Rohwasserentnahmestellen auch den bis Ende 2017 gültigen Maßnahmenwert (MNW) von $10 \mu\text{g/l}$ übersteigen. Der MNW wurde Ende des Jahres 2017 durch das Umweltbundesamt (UBA) auf einen Vorsorge-Maßnahmenhöchstwert von $30 \mu\text{g/l}$ angehoben. Dieser Wert wurde nicht überschritten. Um die Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung beurteilen zu können, ist es notwendig das Ausmaß der Verunreinigung mit TFA abschätzen und quantifizieren zu können. Auch ist es notwendig, die zukünftige Entwicklung der TFA-Verhältnisse im Grundwasser abschätzen zu können.

Im Zusammenhang mit der Beurteilung der TFA-Problematik stehen zunächst folgende allgemeine Fragestellungen im Vordergrund:

- Wie groß ist der Uferfiltratanteil an den einzelnen Brunnen der WVU?
- Wie groß ist die Laufzeit des Uferfiltrats bis zu den einzelnen Brunnen der WVU?
- Wie groß ist die Verdünnung des Neckarufiltratanteils bei stoßartigen Einträgen?

Hinsichtlich der konkreten TFA-Belastung an den Brunnen der WVU sind folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- An welchen Brunnen und zu welchem Zeitpunkt werden der GOW und der MNW überschritten?
- Welche Begrenzung maximaler Frachten von TFA im Neckar sind erforderlich, damit der MNW innerhalb der nächsten 10 Jahre unterschritten wird?
- Welche Begrenzung maximaler Frachten von TFA im Neckar sind erforderlich, damit langfristig der GOW unterschritten wird?
- Wie wirken sich kurzfristige Konzentrationsspitzen von TFA im Neckar im Grundwasser aus?

1.2 ZIELE

Um die anstehenden Fragestellungen beantworten zu können, ist die TFA-Belastung des Grundwassers zu quantifizieren. Hierzu muss ein Werkzeug bereitgestellt werden, das auf der Basis der Entwicklung der Belastungen in der Vergangenheit die aktuellen Verhältnisse beschreibt und mit entsprechenden Annahmen die zukünftigen Verhältnisse prognostiziert. Dieses Werkzeug muss auch als Entscheidungsunterstützung in der Beurteilung von Prognoseszenarien einsetzbar sein.

Ein nach den aktuellen Erkenntnissen entwickeltes Grundwassermodell kann diese Anforderungen erfüllen. Dabei werden die verschiedenen Strömungs- und Transportmechanismen im Grundwasser durch ein mathematisch-numerisches Modell simuliert. Mit einem adäquaten Modellkonzept, den auf die hydrogeologischen Verhältnisse angepassten Anfangs- und Randbedingungen und einer umfangreichen Modellkalibrierung wird dieses Modell in die Lage versetzt, die durch die verschiedenen Messungen bekannte reale Situation möglichst genau nachzubilden. Die Modellkalibrierung ist dabei ein iterativer Prozess, bei dem die im Detail unbekannt Parameter innerhalb von plausiblen Bandbreiten so lange variiert werden, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung vorliegt. Je mehr qualifizierte Informationen zur Entwicklung der Grundwasserbelastung und zur aktuellen Situation vorliegen, desto besser kann das Modell angepasst werden. Ergebnisse aus aktuellen Untersuchungen müssen fortlaufend in das Modell integriert und so das Modell immer wieder fortgeschrieben werden. Unter Berücksichtigung des jeweiligen Kenntnisstands und unter entsprechenden Annahmen für die zukünftigen Randbedingungen wie Grundwasserneubildung und TFA-Konzentration im Neckar sowie diffuser Eintragsquellen lassen sich mit Hilfe des Modells auch zukünftige Entwicklungen abschätzen. Das Grundwassermodell ist entsprechend der aktuellen Datenlage unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Interpretation des Untergrunds aufgebaut. Das Grundwassermodell muss zunächst die zeitlich variablen Strömungsverhältnisse und in einem zweiten Schritt den TFA-Transport abbilden. Dazu zählt eine plausible und nachvollziehbare Bilanz der Grundwasserströme und der TFA-Masse.

2 Hydrogeologie

2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet liegt im überregionalen Grundwasserleiter des Oberrheingrabens, der aus teils mächtigen quartären Ablagerungen besteht. Es umfasst Teile des Rhein-Neckar-Kreises und der Stadtkreise Heidelberg und Mannheim, die im Oberrheingraben liegen. Das Untersuchungsgebiet lässt sich anhand der derzeitigen Kenntnisse zum Einfluss des Neckars auf den Grundwasserleiter im Rhein-Neckar-Raum eingrenzen. Es muss den Bereich umfassen, in dem Uferfiltratanteile des Neckars im Grundwasser zu finden sind, da die TFA-Belastung aus Neckarwasser resultiert, das durch Infiltration in den Grundwasserleiter gelangt ist und dort mit der natürlichen Grundwasserströmung transportiert wird.

In Abbildung 2.1 ist die Lage des Untersuchungsgebiets TFA innerhalb des großräumigen Grundwassermodells Karlsruhe-Worms dargestellt. Der Untersuchungsraum lässt sich damit auf den Bereich des Grabenrands bei Heidelberg bis nach Mannheim in Ost/West-Richtung eingrenzen. In nördlicher Richtung ist die Grenze des Neckarufiltrats zwischen Heddeshheim und Viernheim zu erwarten und im Süden lässt sich die Ausdehnung des Uferfiltratanteils bis in den Raum zwischen Eppelheim und Rheinau abschätzen.

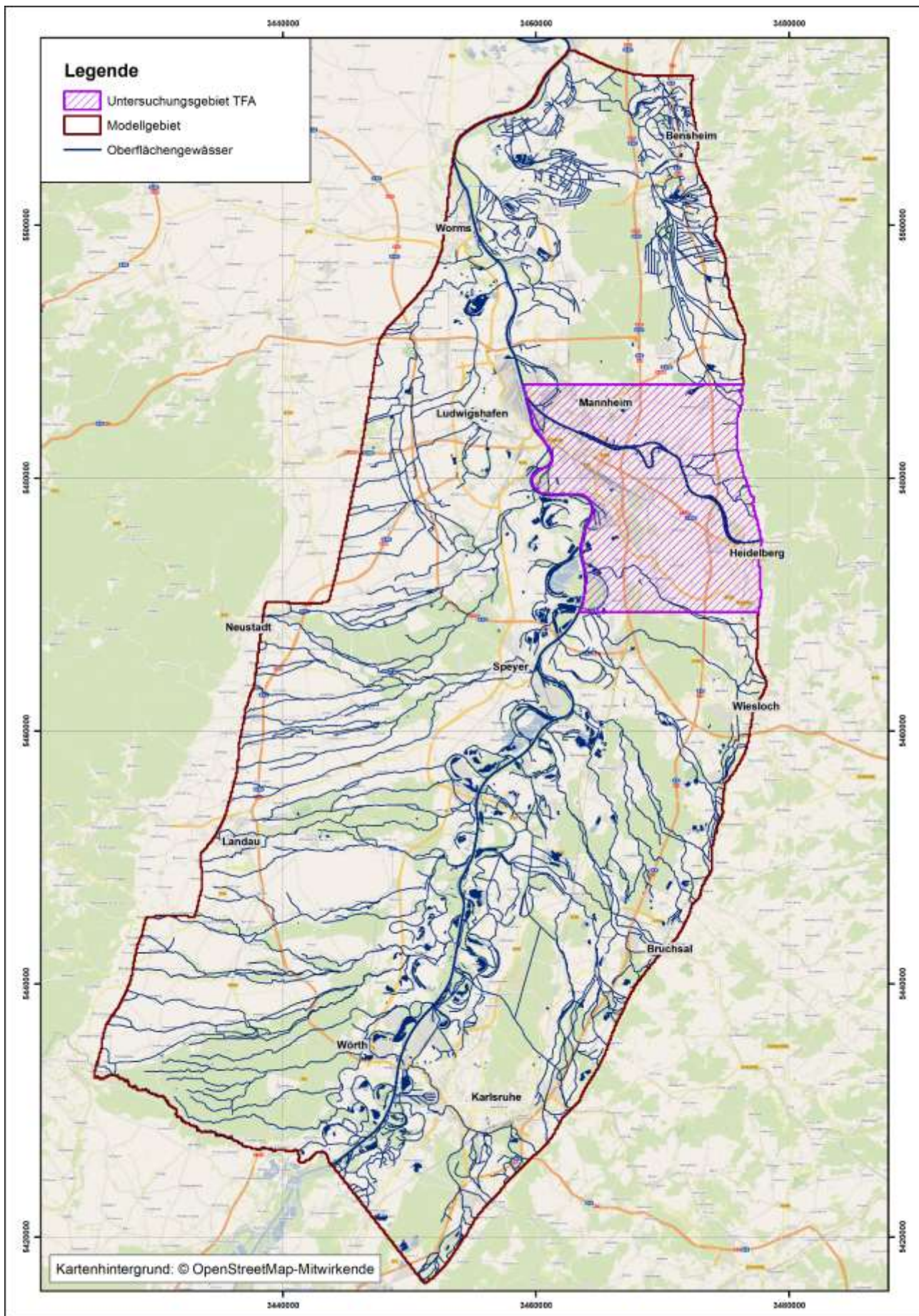


Abbildung 2.1: Lage des Untersuchungsgebiets TFA im großräumigen Kontext

2.2 HYDROGEOLOGISCHE EINHEITEN

Für den quartären Grundwasserleiter des Oberrheingrabens wurde vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) ein großräumiges hydrogeologisches Modell erarbeitet (Wirsing und Luz, 2007).

Generell lässt sich der quartäre Grundwasserleiter im Rhein-Neckar-Raum in drei hauptsächliche hydrogeologische Einheiten untergliedern:

- Obere kiesig-sandige Abfolge (OksA) oder Oberer Grundwasserleiter (OGWL)
- Mittlere kiesig-sandige Abfolge (MksA) oder Mittlerer Grundwasserleiter (MGWL)
- Untere sandig-schluffige Abfolge (UssA) oder Unterer Grundwasserleiter (UGWL)

Der Obere Grundwasserleiter wird vor allem nördlich des Neckars am Grabenrand durch den Zwischenhorizont ZH1 in einen oberen und unteren Grundwasserleiter unterteilt. Diese hydraulische Trennwirkung des ZH1 ist aber im Untersuchungsraum vergleichsweise gering und es liegen keine detaillierten Informationen zur Trennwirkung des ZH1 vor.

Zwischen dem Oberen und Unteren Grundwasserleiter liegt der Obere Zwischenhorizont OZH, der insbesondere im Raum Mannheim eine gute Trennfunktion aufweist und zu deutlichen Potenzialunterschieden zwischen den beiden Grundwasserleitern führt.

Der Mittlere Grundwasserleiter lässt sich lokal in einen oberen, mittleren und unteren Grundwasserleiter unterteilen. Die Trennung erfolgt über die Zwischenhorizonte ZH2 und ZH3, die bereichsweise Lücken aufweisen, in denen die Zwischenhorizonte nicht vorliegen.

Der Untere Grundwasserleiter wird über den Unteren Zwischenhorizont UZH vom Mittleren Grundwasserleiter hydraulisch getrennt. Dadurch ergibt sich die in Tabelle 2.1 schematisch zusammengestellte Abfolge der hydrogeologischen Einheiten im Untersuchungsraum.

Tabelle 2.1: Abfolge der hydrogeologischen Einheiten im Untersuchungsraum und deren hydraulische Funktion

Hydrogeologische Einheit	Grundwasserleiter/Geringleiter
OGWL oben	Grundwasserleiter
ZH 1	Geringleiter
OGWL unten	Grundwasserleiter
OZH	Geringleiter
MGWL oben	Grundwasserleiter
ZH 2	Geringleiter
MGWL mitte	Grundwasserleiter
ZH 3	Geringleiter
MGWL unten	Grundwasserleiter
UZH	Geringleiter
UGWL	Grundwasserleiter

LW:W

2.3 HYDROGEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN

Den hydrogeologischen Einheiten lassen sich unterschiedliche hydraulische Eigenschaften zuordnen. Die hydraulischen Eigenschaften bestimmen die Strömungsverhältnisse und die Ausbreitung von Wasserinhaltsstoffen. Weisen die hydrogeologischen Einheiten grob körniges Material auf, so ist davon auszugehen, dass diese eine höhere Durchlässigkeit haben und damit auch Wasserinhaltsstoffe wie TFA schneller transportiert werden als in Schichten mit geringer Durchlässigkeit. Beispielhaft ist in Abbildung 2.2 Untergrundmaterial aus einer Kernbohrung im Untersuchungsgebiet dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass der Untergrund aus unterschiedlichen Kiesen und Sanden besteht und eine vergleichsweise heterogene Durchlässigkeitsstruktur aufweist. Diese lokale heterogene Struktur wird im Grundwassermodell zu Homogenbereichen zusammengefasst. Vertikal orientiert sich die Schichteinteilung im Modell an den hydrogeologischen Schichtgrenzen, die vom LGRB aus den Bohrprofilen abgeleitet wurden.

Die hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds lassen sich nur lokal z. B. mit Hilfe von Pumpversuchen bestimmen. Im Untersuchungsgebiet liegen mehrere Informationen aus Pumpversuchen vor, aus denen hervorgeht, dass tendenziell die hydraulische Durchlässigkeit mit der Tiefe abnimmt.



Abbildung 2.2: Material aus einer Kernbohrung im Untersuchungsgebiet

Da die Untergrundeigenschaften nur punktuell bekannt sind, ist es die Aufgabe der Modellkalibrierung hier ein plausibles, flächendeckendes Abbild der tatsächlichen Verhältnisse zu ermitteln. In der Modellkalibrierung für Strömungsverhältnisse wird deshalb die Durchlässigkeitsstruktur so lange variiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Informationen vorliegt. Im vorliegenden Fall sind es für die Strömungskalibrierung Grundwasserstände, die an Grundwassermessstellen und Brunnen gemessen werden.

Aber der Grundwasserstand alleine reicht nicht aus, um den Transport von Wasserinhaltsstoffen im Grundwasser quantifizieren zu können. Es müssen auch Informationen zum durchflusswirksamen Hohlraumanteil und zur Dispersivität ermittelt werden. Die Dispersivität beschreibt die Eigenschaft eines Grundwasserleiters Inhaltsstoffe nicht ausschließlich entlang eines Transportpfades zu bewegen, sondern durch die Umströmung des Korngerüsts und kleinräumiger Durchlässigkeitsunterschiede sowohl in Strömungsrichtung als auch quer dazu aufzufächern.

Der Hohlraumanteil und die Dispersivität lassen sich nur mit aufwändigen Markierungsversuchen messtechnisch erfassen. Bei einem Markierungsversuch wird Grundwasser mit einem unbedenklichen Stoff markiert und die Ausbreitung innerhalb des Grundwasserleiters an den verfügbaren Grundwassermessstellen beobachtet. Die Durchführung eines Markierungsversuches ist mit großem Aufwand verbunden und liefert bei erfolgreicher Durchführung nur lokale Informationen zwischen dem Eingabe- und Beobachtungspunkt. Bei flächenhafter Ausbreitung von Wasserinhaltsstoffen können so genannte natürliche Tracer oder Wasserinhaltsstoffe, die sich einem bestimmten Wasserkörper zuordnen lassen, hilfreiche Informationen zu den weiteren Transportparametern liefern.

3 Trifluoracetat (TFA)

TFA bezeichnet in diesem Bericht das Salz der Trifluoressigsäure. TFA ist eine synthetische chemische Verbindung aus der Gruppe der Carbonsäuren. Sie entstammt der Gruppe Essigsäuren, wobei alle drei Wasserstoffatome der Methylgruppe durch Fluoratome ersetzt sind.

3.1 TRANSPORTEIGENSCHAFTEN

Die Salze und Ester der Trifluoressigsäure zählen zur Chemikaliengruppe der kurzkettigen perfluorierten Chemikalien. Nach heutigem Kenntnisstand unterliegt TFA keinem nennenswerten mikrobiellen oder chemischen Abbau, so dass davon ausgegangen werden muss, dass eine konservative Betrachtung ohne Massenverlust im Grundwassermodell ausreicht. Auch ist keine Anhaftung von TFA am Aquifermaterial bekannt, das auf eine so genannte Adsorption hinweist, die zu einer Verlangsamung des Transports führt.

3.2 GESUNDHEITLICHER ORIENTIERUNGSWERT UND MAßNAHMENWERT

Für die Beurteilung der Toxizität eines Stoffes im Trinkwasser wird gemäß Umweltbundesamt (Internetauftritt UBA zum Thema Toxikologie des Trinkwassers vom 17.01.2017) wie folgt differenziert:

„Toxikologen unterscheiden dabei zwischen einer lebenslangen (gesundheitlicher Leitwert) und einer zeitlich kürzeren geduldeten Belastung durch eine Substanz (Maßnahmenwert). Gesundheitlich vorsorgliche Bewertungen berücksichtigen zudem mögliche Kombinationswirkungen mehrerer Stoffe, besondere Risikogruppen (z. B. Säuglinge), Anreicherungen im Körper, die Vermeidbarkeit der Verunreinigungen sowie die Möglichkeiten ihrer Reduzierung oder Entfernung bei der Trinkwasseraufbereitung.“

Stoffe ohne vollständige toxikologische Bewertung werden auf Basis der vorhandenen Daten unter dem Gesichtspunkt der gesundheitlichen Vorsorge bewertet. Dabei wird der „gesundheitliche Orientierungswert (GOW)“ abgeleitet. Abhängig vom Wirkmechanismus wird der Wert in einem Bereich von 0,01 bis 3,0 µg/l festgelegt. Der GOW wird so niedrig angesetzt, dass auch bei lebenslanger Aufnahme der betreffenden Substanz kein Anlass zur gesundheitlichen Besorgnis besteht.“

TFA zählt zu den sogenannten unerwünschten Stoffen, die auch als Abbauprodukt von Pflanzenschutzmitteln entstehen können. Laut Einschätzung des Umweltbundesamtes (UBA) gefährden sie in geringen Konzentrationen weder das Grundwasser noch die Gesundheit von Mensch oder Tier. Allerdings liegen hierzu noch keine Grenzwerte vor. Aus diesem Grund wurden bislang ein gesundheitlicher Orientierungswert von 3 µg/l und ein Maßnahmenwert von 10 µg/l vorgegeben.

Mit Schreiben vom 16.11.2017 wurde vom UBA ein Vorsorge-Maßnahmenhöchstwert von 30 µg/l neu festgelegt, da mit den geplanten Tierversuchen Maßnahmen getroffen wurden und angesichts der Kenntnisse zur Quelle und den Eintragungspfaden eine Erhöhung des Maßnahmenwertes gerechtfertigt werden kann.

3.3 TFA-KONZENTRATIONEN IM NECKAR

Die erhöhten TFA-Konzentrationen im Neckar entstammen im Wesentlichen einer industriellen Produktion oberstrom des Neckareintritts in den Oberrheingraben bei Heidelberg. Hier wurden bis Herbst 2016 erhöhte TFA-Frachten eingeleitet. Nach Bekanntwerden der Problematik für die Trinkwasserversorgung im Rhein-Neckar-Raum wurde die Produktion umgehend umgestellt und damit die TFA-Fracht erheblich verringert. Derzeit erfolgen weitere Optimierungen, so dass die TFA-Einleitung in den Neckar weiter reduziert wird.

Aus der Vergangenheit vor Oktober 2016 stehen keine Messdaten zur TFA-Konzentration im Neckar zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde vom Regierungspräsidium Stuttgart, als der für den Betrieb der industriellen Produktion zuständigen Genehmigungs- und Überwachungsbehörde, anhand von Produktionszahlen die in der Vergangenheit in den Neckar eingeleitete TFA-Fracht abgeschätzt. Dabei wurden zunächst mittlere Frachten bestimmt und über eine Sensitivitätsbetrachtung ein niedriger und hoher Eintrag ermittelt. Da die Frachtermittlung auf zahlreichen Annahmen basiert, ist diese mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die TFA-Transportberechnungen haben gezeigt, dass der TFA-Eintrag vor 2016 mindestens der Variante mit vergleichsweise hohem Eintrag entsprechen muss. Über den Abfluss im Neckar wurde aus der vergleichsweise hoch abgeschätzten TFA-Fracht die monatliche TFA-Konzentration im Neckar gemäß Abbildung 3.1 ermittelt. Diese weist eine seit 1999 ansteigende TFA-Konzentration auf, die sich aus der industriellen Einleitung ergibt. Bei vergleichsweise geringen Abflüssen im Neckar ergeben sich maximale TFA-Konzentrationen von bis zu 80 µg/l. In Zeiten mit mittlerem und hohem Neckarabfluss sind die TFA-Konzentrationen deutlich geringer.

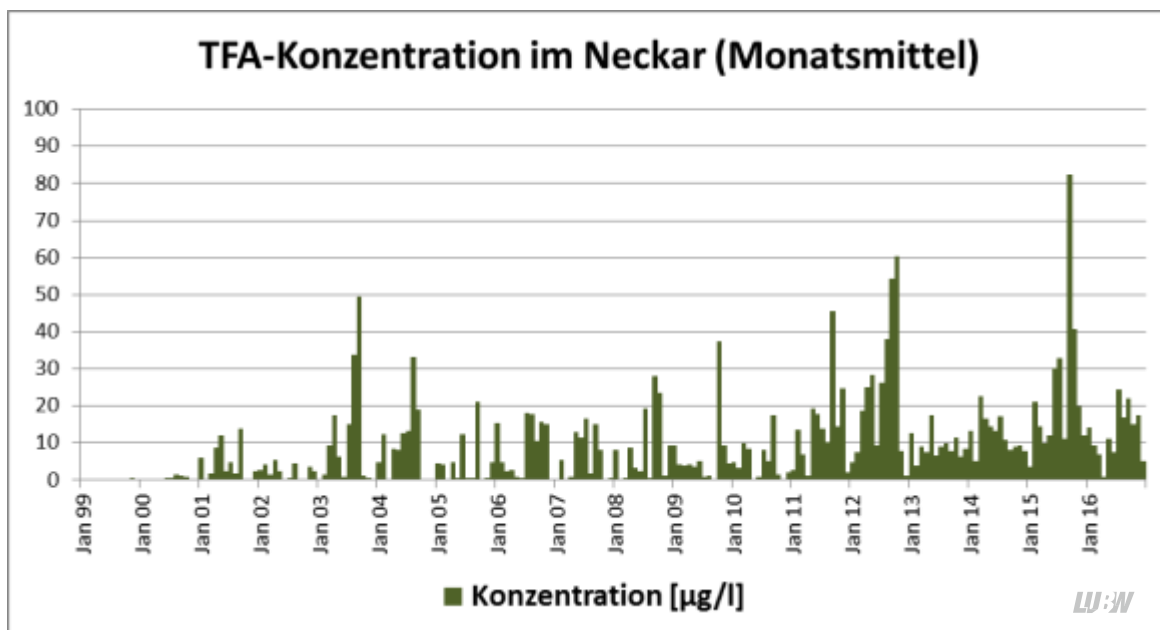


Abbildung 3.1: Aus Produktionsinformationen abgeschätzte TFA-Konzentration im Neckar seit 1999

4 Modellaufbau

4.1 MODELLGEBIET, HORIZONTALE DIFFERENZIERUNG UND RANDBEDINGUNGEN

Das Untersuchungsgebiet für die TFA Problematik erstreckt sich im Rhein-Neckar-Raum von Heidelberg im Osten bis Mannheim im Westen. Die meisten betroffenen Trinkwassergewinnungen entnehmen das Grundwasser südlich des Neckars. Die Infiltration von Neckarwasser findet allerdings beidseitig des Neckars statt. Für den quartären Grundwasserleiter im Oberrheingraben zwischen Karlsruhe und Worms existiert ein großräumiges Grundwassermodell, das auf der Basis der aktuellen hydrogeologischen Kenntnisse unter Berücksichtigung des hydrogeologischen Modells des LGRB nach Wirsing und Luz (2007) aufgebaut wurde. Die Ausdehnung dieses großräumigen Grundwassermodells mit ausgewählten Randbedingungen ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Im Süden wird das Modellgebiet entlang einer Festpotenziallinie zwischen dem Rhein und dem Grabenrand südlich von Karlsruhe abgegrenzt. Der westliche Teil der Südgrenze wird von der Lauter als Leakagerand gebildet. Die Südgrenze des Modells schließt an das zweite südliche großräumige Grundwassermodell für den Oberrheingraben an, das im Wesentlichen im Zusammenhang mit Fragestellungen zum Nitrattransport in den Projekten MoNit und LOGAR erarbeitet wurde. Im Westen und Osten wird das Modellgebiet für den nördlichen Teil des Oberrheingrabens durch den Grabenrand begrenzt. Hier wurde ein unterirdischer Zustrom aus den angrenzenden oberirdischen Einzugsgebieten als Randbedingung angesetzt. Im Norden ist das Modellgebiet beidseitig des Rheins jeweils entlang einer angenommenen Stromlinie abgegrenzt, da die Grundwasserströmung im Wesentlichen vom Grabenrand zum Rhein hin verläuft. Im Bereich Worms bildet der Rhein im nördlichen Abschnitt den Modellrand. Hier ist eine Leakagerandbedingung für den Austausch mit dem Rhein definiert.

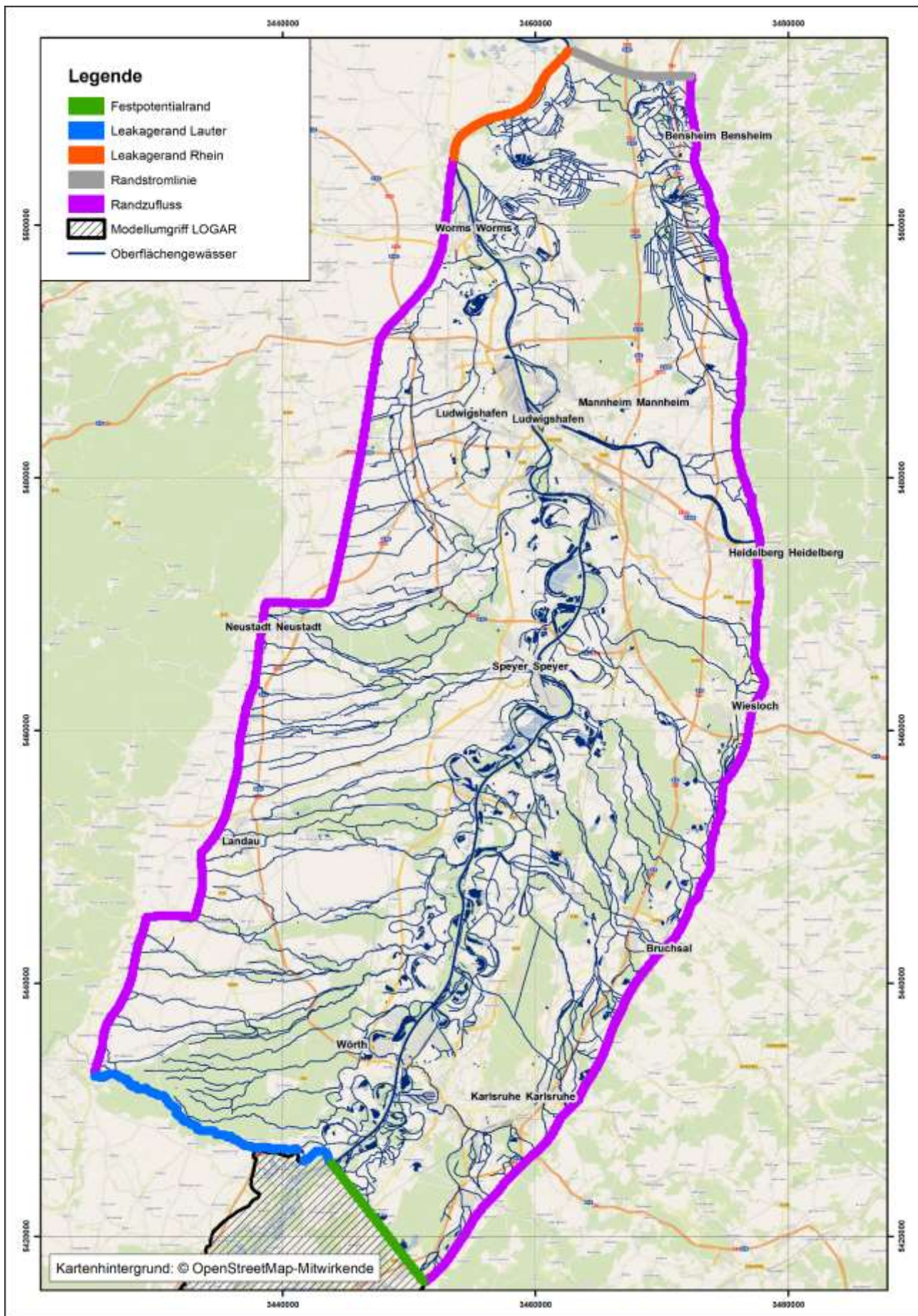


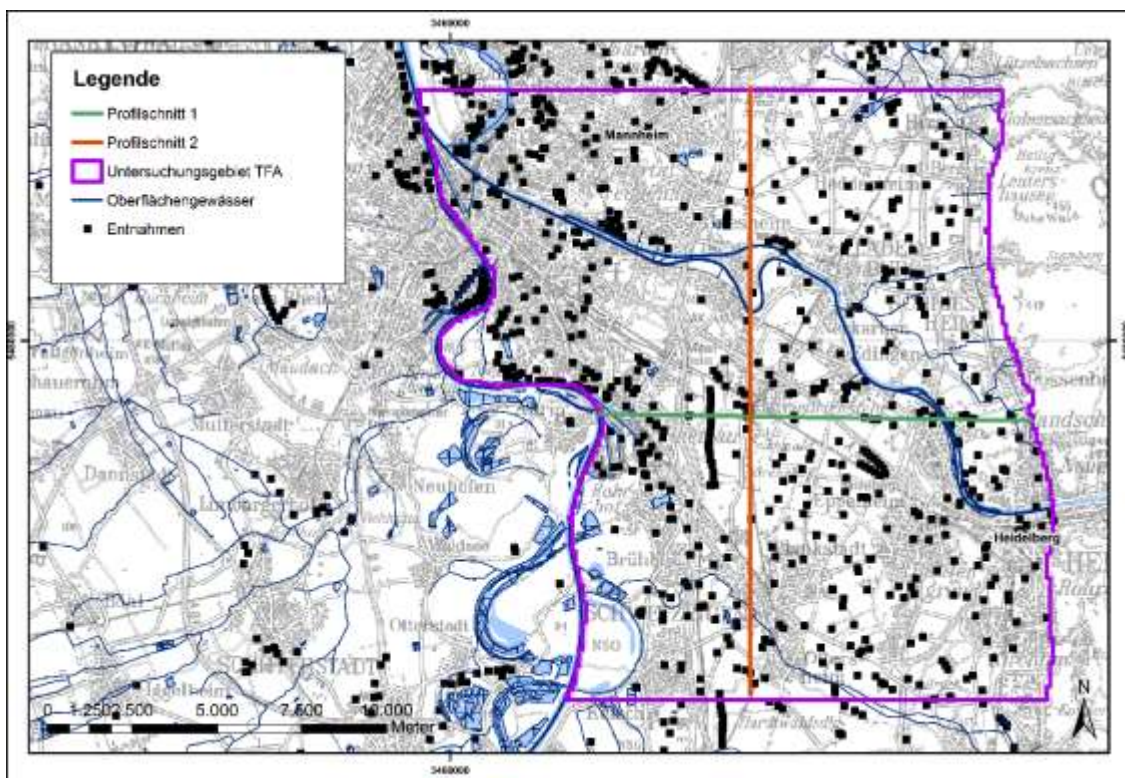
Abbildung 4.1: Modellgebiet Karlsruhe-Worms mit ausgewählten Randbedingungen

Die Grundwasserströmung sowohl im nördlichen als auch im südlichen Modellgebiet wird auf Basis des vom United States Geological Survey entwickelten Programmsystems MODFLOW berechnet. Dieses Programmsystem wurde von der LUBW für den Einsatz im Oberrheingraben durch zusätzliche und modifizierte Randbedingungs-Packages weiterentwickelt und kommt für die Fragestellungen im Oberrheingraben zum Einsatz. Das Programmsystem MODFLOW basiert auf dem Finite-Differenzen-Verfahren und verwendet ein zeilen- und spaltenorientiertes Modellnetz. Im Oberrheingraben kommt dabei ein gleichmäßiges Modellnetz mit Quadraten zum Einsatz, die eine Seitenlänge von 100 m haben. Daraus resultiert eine Modellgröße in horizontaler Ebene von 977 Zeilen und 533 Spalten entsprechend einer Modellzellenanzahl von 520.741 in jeder Modellschicht.

4.2 VERTIKALE DIFFERENZIERUNG

Die vertikale Differenzierung des Grundwassermodells erfolgt in durchgängigen Modellschichten. Jeder hydrogeologischen Einheit gemäß Tabelle 2.1 wird eine Modellschicht zugeordnet. Damit ergeben sich im numerischen Modell insgesamt 11 Modellschichten. In Abbildung 4.2 ist die Lage von zwei Schnittpuren im Untersuchungsraum dargestellt. Schnitt 1 (siehe Abbildung 4.3) verläuft in Ost-West-Richtung entlang der ungefähren Strömungsrichtung südlich des Neckars durch die Wassergewinnungsgebiete Rauschen und Rheinau. Der Schnitt 2 (siehe Abbildung 4.4) ist in Nord-Süd-Richtung gelegt und zeigt den hydrogeologischen Bau in Längsrichtung des Oberrheingrabens.

Aus den Schnitten wird deutlich, dass die wesentliche hydraulische Trennung zum oberflächennahen Grundwasser durch den OZH erfolgt, der durchgängig ausgebildet ist. Stoffe die aus dem Neckar und damit oberflächennah in das Grundwasser eingetragen werden breiten sich zunächst vordringlich im Oberen Grundwasserleiter aus.



LUBW

Abbildung 4.2: Schnittpuren der Profilschnitte durch das Untersuchungsgebiet TFA

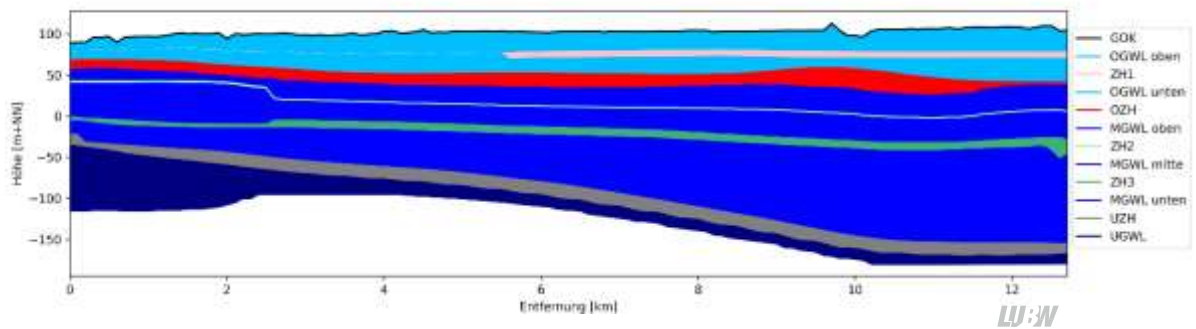


Abbildung 4.3: Vertikale Gliederung im Verlauf von Schnitt 1

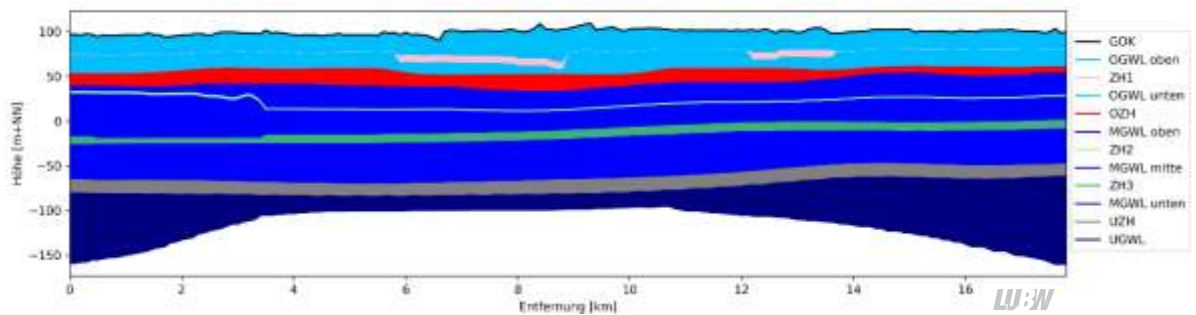


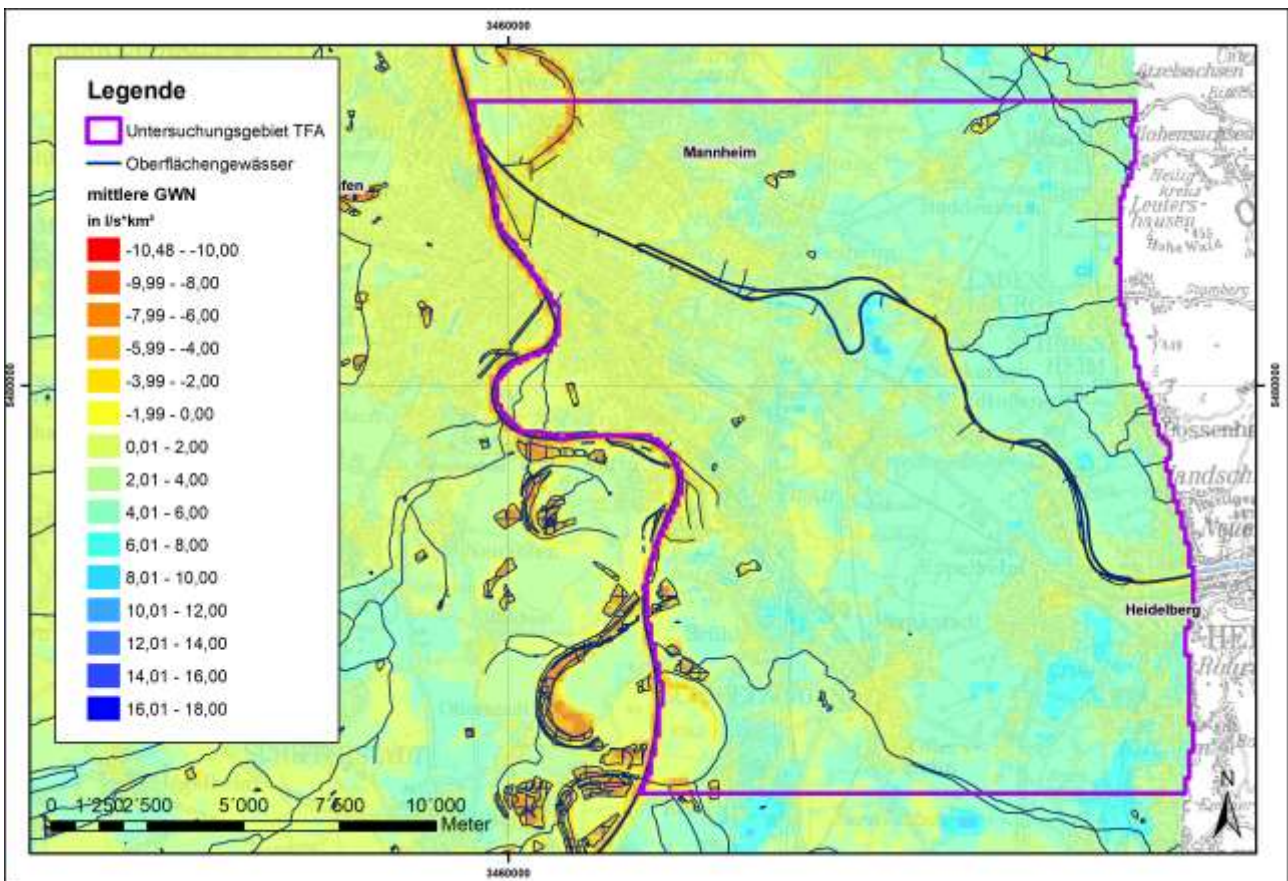
Abbildung 4.4: Vertikale Gliederung im Verlauf von Schnitt 2

4.3 BETRACHTUNGSZEITRAUM UND ZEITLICHE DIFFERENZIERUNG

Nach den vorliegenden Erkenntnissen weist der Neckar eine erhöhte TFA-Konzentration in etwa seit 1999 auf. Aus diesem Grund muss die Simulation der Historie mindestens den Zeitraum von 1999 bis aktuell umfassen. Im Rahmen der instationären Strömungskalibrierung liegt inzwischen ein Zeitraum von 1970 bis 2016 vor, so dass auch vor der Zeit des erhöhten TFA-Eintrags die GW-Strömungsverhältnisse modellmäßig beschrieben sind. Zu Beginn der TFA-Betrachtungen reichte das instationäre Strömungsmodell bis zum Jahresende 2008 und wurde dann um die Zeitspanne 2009 bis 2016 mit den erforderlichen Randbedingungen aktualisiert. Innerhalb des gesamten Zeitraumes ist das Grundwassermodell in monatliche Zeitschritte unterteilt. Für diese monatlichen Zeitschritte liegen differenzierte Informationen zur Grundwasserneubildung aus Niederschlag durch die Berechnung von Sickerwasserraten mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW vor. Außerdem ist die zeitliche Variation der Rhein- und Neckarwasserstände berücksichtigt. Über eine hydrologische Modellbetrachtung liegen monatliche Daten zu den oberirdischen Zuflüssen am Grabenrand vor. Die Datenlage bei den Grundwasserentnahmen ist vergleichsweise heterogen. Hier liegen teilweise monatsdifferenzierte Angaben vor. Ist dies nicht der Fall, so werden die Jahresentnahmen aus dem Wasserentnahmeentgelt der Modellbetrachtung zu Grunde gelegt.

4.4 GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM RHEIN-NECKAR-RAUM

Die Grundwasserneubildung wurde im gesamten Modellraum mit dem Modell GWN-BW flächendifferenziert und in monatlicher Auflösung bestimmt. Die Grundwasserneubildung ist eine flächige Zuflussrandbedingung an der Modelloberkante. Im Rhein-Neckar-Raum ergibt sich eine mittlere Grundwasserneubildungsverteilung entsprechend Abbildung 4.5. Diese weist Neubildungsraten von 2 bis 6 l/s*km² auf. Generell nimmt die Neubildungsrate zum östlichen Grabenrand hin zu. Die geringsten Neubildungsraten sind im Raum Mannheim zu finden.



LUBW

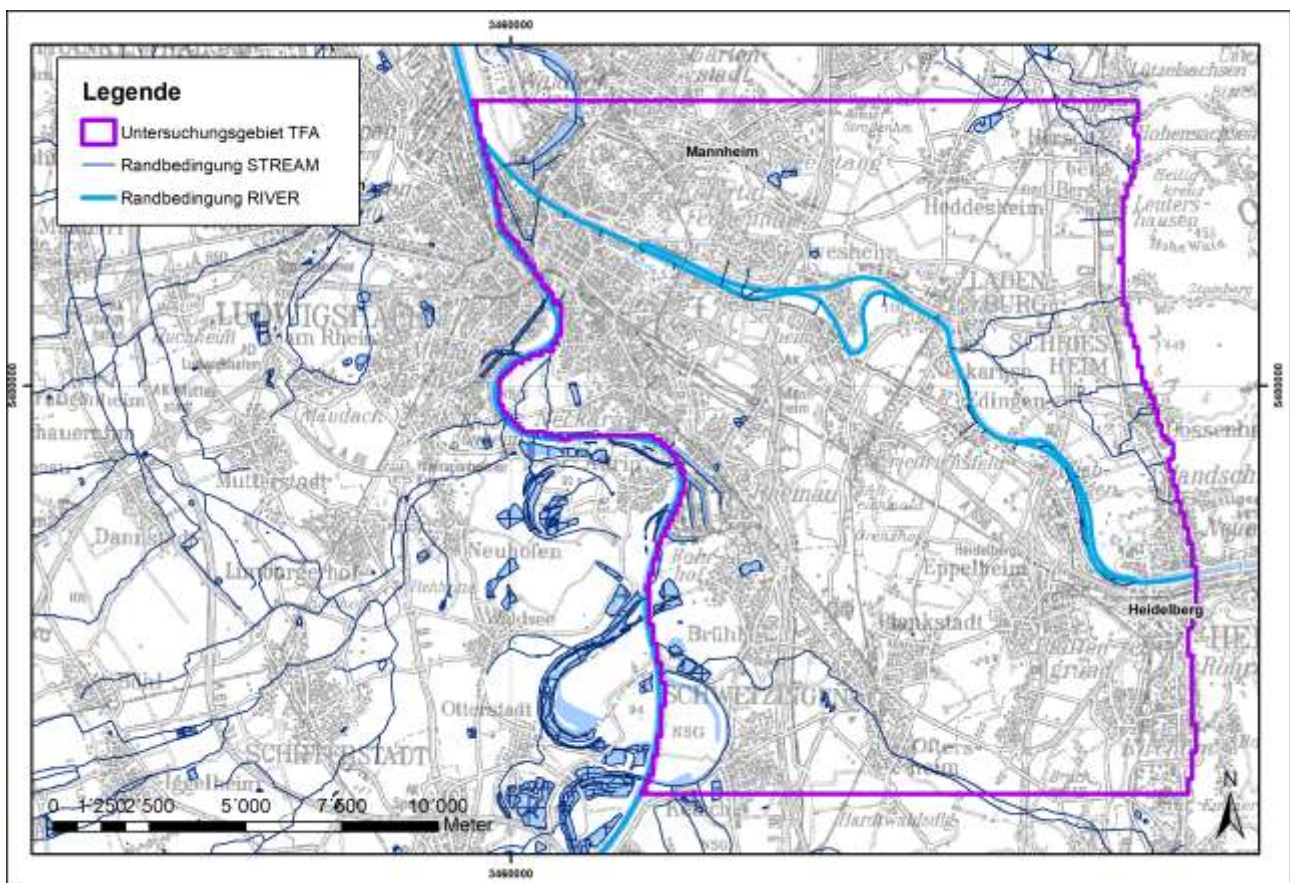
Abbildung 4.5: Mittlere Grundwasserneubildungsverteilung im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum

4.5 RANDBEDINGUNG DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Bei der Randbedingung der Oberflächengewässer ist zwischen den Hauptgewässern Rhein- und Neckar sowie dem feinmaschigen Gewässernetz zu unterscheiden. Generell werden alle Fließgewässer über eine Leakagerandbedingung simuliert. Bei Rhein- und Neckar wird die Wasserspiegelhöhe aus Messwerten abgeleitet. Dabei werden die instationären Wasserspiegel entlang dieser Gewässer aus so genannten Wasserspiegel/Abflussbeziehungen bestimmt. Aus den gemessenen Abflüssen und dem bekannten Zusammenhang zwischen Abfluss und Wasserstand werden die Wasserstände über den gesamten Verlauf ermittelt und dem Grundwassermodell vorgegeben. Im Falle von Hochwasserabflüssen kommt es zu Ausuferungen insbesondere im Rhein und Altneckar. Diese Ausuferungsflächen sind in der Modellbetrachtung in Abhängigkeit des Flusswasserspiegels dynamisch mitberücksichtigt.

Bei dem feinmaschigen Gewässernetz erfolgt eine mit dem Grundwassermodell gekoppelte Bilanzbetrachtung in den einzelnen Gewässersegmenten. In dieser Betrachtung wird je Gewässersegment eine Bilanzierung des oberstromigen Zuflusses, des unterstromigen Abflusses und des Austausches mit dem Grundwasserleiter durchgeführt. Über diese Bilanzbetrachtung und unter der Annahme einer Normalabflussbeziehung wird dann der passende Wasserspiegel im Gewässersegment für jeden Zeitschritt während der Grundwasserströmungsberechnung berechnet. Dies hat den Vorteil, dass insbesondere grundwassergespeiste Gewässer bilanztreu berücksichtigt werden können.

Die im Grundwassermodell als Gewässerrandbedingung im Rhein-Neckar-Raum angesetzten Gewässer sind in Abbildung 4.6 dargestellt.



LUBW

Abbildung 4.6: Gewässernetz im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum

4.6 ENTNAHMEN IM RHEIN-NECKAR-RAUM

Der quartäre Grundwasserleiter des Oberrheingrabens wird zur Trinkwassergewinnung, für industrielle Zwecke und für landwirtschaftliche Bewässerungen genutzt. Die Lage der Entnahmebrunnen im Rhein-Neckar-Raum ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Für die Trinkwasserversorgung im Ballungsraum Mannheim-Heidelberg stehen im Einflussbereich des Neckars folgende Entnahmebereiche zur Verfügung:

- **Wasserwerk Rauschen:** Die Trinkwasserversorgung der Stadt Heidelberg wird über das Wasserwerk Rauschen zu großen Teilen sichergestellt. Die Entnahme erfolgt aus 13 Brunnen, die im oberen Grundwasserleiter verfiltert sind. Die Brunnen liegen südlich des Neckars ca. 5,5 km vom Grabenrand entfernt. Die durchschnittliche Gesamtentnahme lag in den letzten 10 Jahren bei rd. 130 l/s.

- Wasserwerk Rheinau: Das Wasserwerk Rheinau ist ein wesentlicher Bestandteil der Trinkwasserversorgung von Mannheim. Die Brunnengalerie mit 32 Brunnen ist in nordsüdlicher Richtung ausgerichtet. Die Brunnen sind im Oberen Grundwasserleiter verfiltert. Die durchschnittliche Gesamtentnahme lag in den letzten 10 Jahren bei rd. 270 l/s
- Edingen-Neckarhausen: Die Wasserversorgung der Gemeinde Edingen-Neckarhausen erfolgt an drei Standorten, die jeweils südlich des Neckars liegen. An den beiden südlichen Standorten der Pumpwerke 1 und 2 sind jeweils zwei Brunnen, die aus dem Oberen Grundwasserleiter entnehmen. Am nördlichen Standort ist ein Brunnen vorhanden, der seit 2004 nicht mehr zur Trinkwasserversorgung genutzt wird. Die durchschnittliche Gesamtentnahme lag an den genutzten Brunnen in den letzten 10 Jahren bei ca. 51 l/s.
- Ladenburg: Die Trinkwasserversorgung von Ladenburg wird durch 3 Brunnen im Oberen und einen Tiefbrunnen im Mittleren Grundwasserleiter sichergestellt. Die 4 Brunnen befinden sich alle nördlich des Neckars. Die durchschnittliche Gesamtentnahme lag in den letzten 10 Jahren bei ca. 66 l/s.

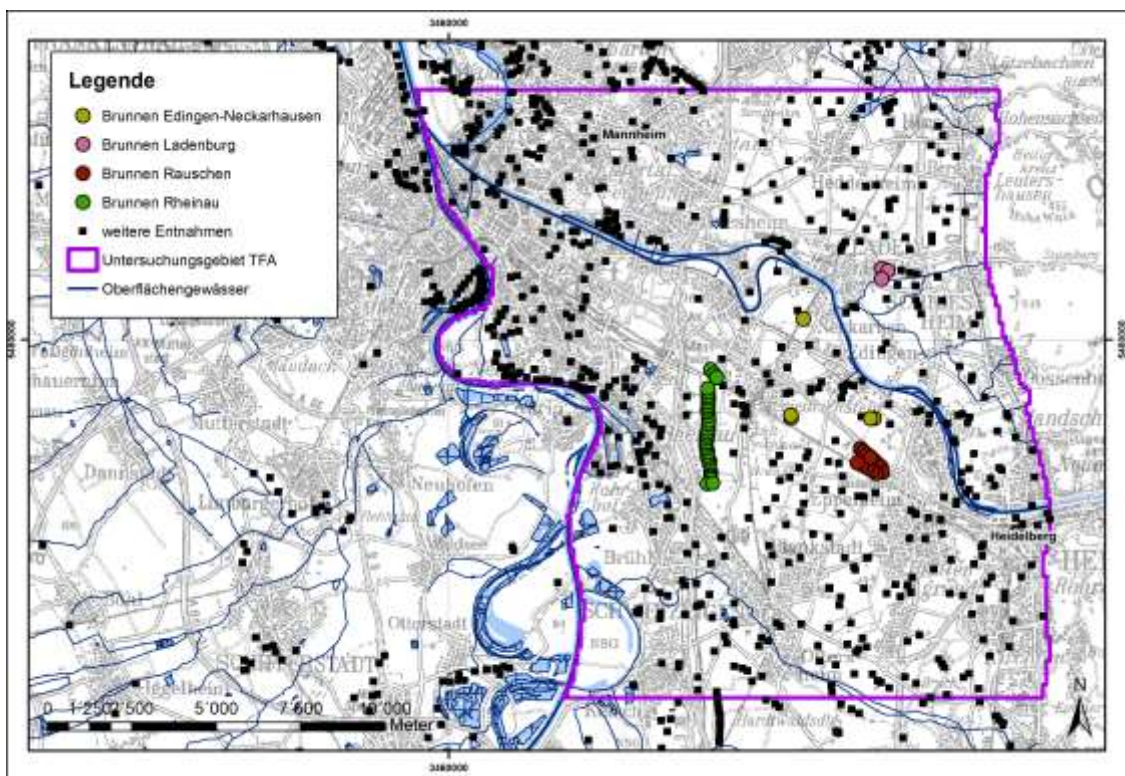


Abbildung 4.7: Lage der Grundwasserentnahmestellen im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum

5 Modellkalibrierung der GW-Strömung

5.1 STATIONÄRE GRUNDWASSERSTÄNDE

Das dreidimensionale Grundwasserströmungsmodell wurde anhand aller verfügbaren Daten entsprechend dem hydrogeologischen Modell aufgebaut. Zunächst erfolgte eine zeitlich konstante (stationäre) Betrachtung für mittlere GW-Verhältnisse. Im Rahmen einer Modellkalibrierung wurden die Durchlässigkeitsverhältnisse und die Austauschkoefizienten mit den Gewässern im Untersuchungsraum so lange variiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen vorhanden war. Für die stationäre Betrachtung wurde die Grundwasseroberfläche am Stichtag 20.10.1986 verwendet. Bei der Variation der Aquiferparameter wurde auf die Plausibilität der kalibrierten Parameter gemäß dem hydrogeologischen Modell (vgl. Kap. 2) geachtet. Um die Modellanpassung zu überprüfen, wurde neben statistischen Parametern auch ein Streudiagramm entsprechend Abbildung 5.1 erstellt.

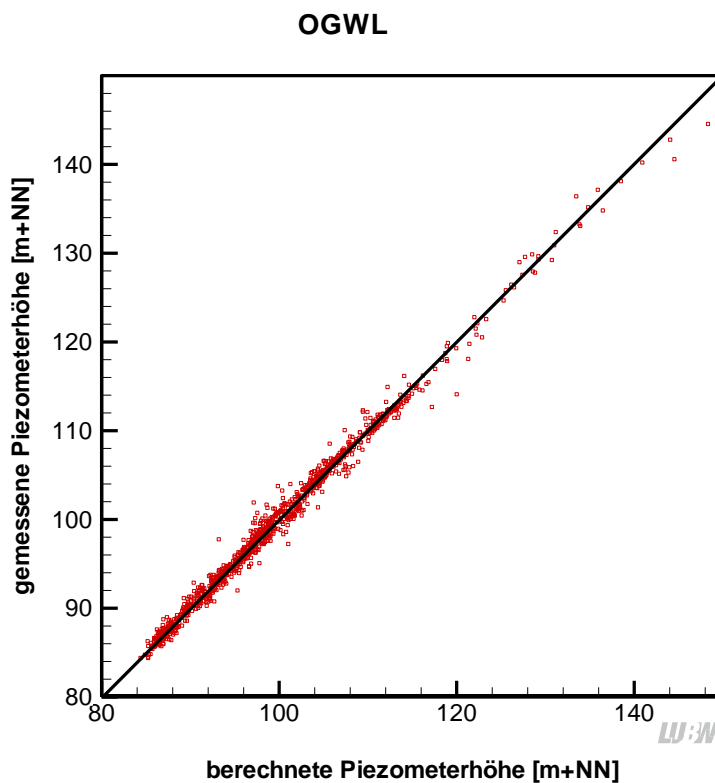
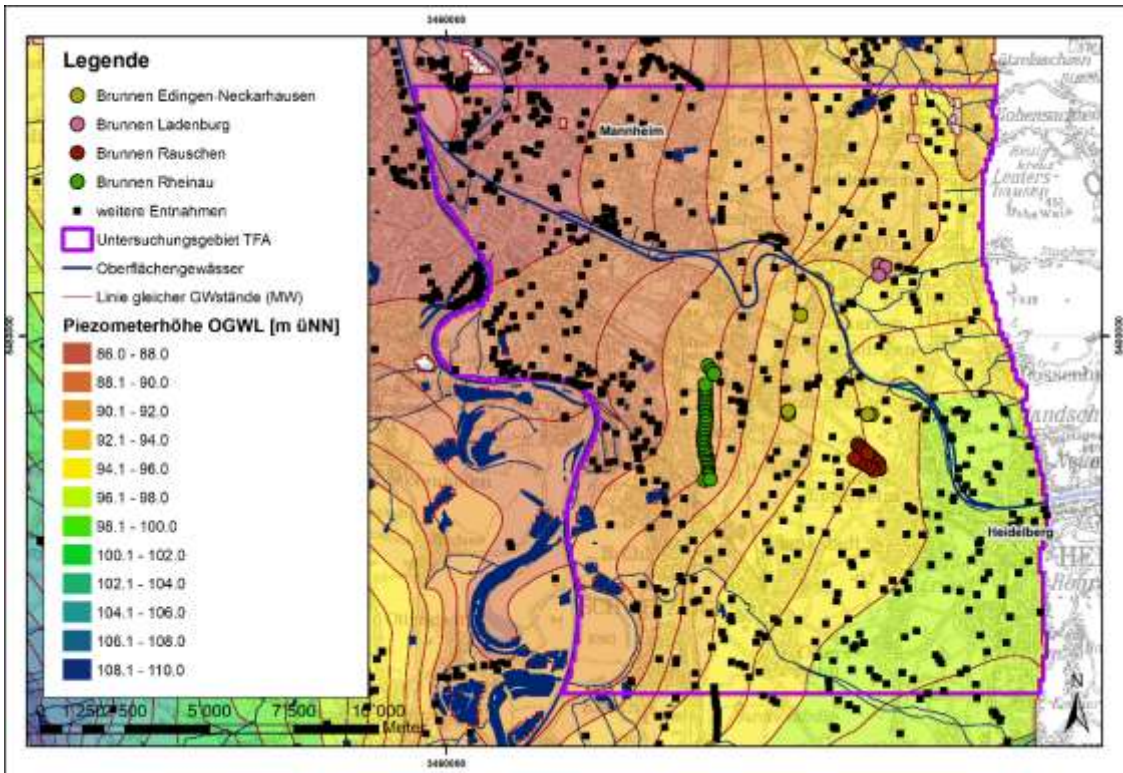


Abbildung 5.1: Scatterdiagramm mit gemessenen und berechneten Grundwasserständen im OGWL (Gesamtmodell)

Im hypothetischen Fall einer exakten Abbildung der gemessenen Werte würden die dargestellten Wertepaare auf der Winkelhalbierenden liegen. Tatsächlich streuen diese um die Winkelhalbierende gleichmäßig. Es sind keine Trends zu zu hohen oder zu niedrigen berechneten Grundwasserständen zu verzeichnen. Auch die Streubreite ist vergleichsweise gering und es wird eine mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten von unter 30 cm erreicht. Bezieht man diese Differenz auf den Piezometerhöhenunterschied im Modellgebiet, so liegt dieser unter 1 %. Nach dem DVGW Arbeitsblatt W107 ist damit eine sehr gute Modellanpassung erzielt.

Eine alleinige stationäre Strömungsbetrachtung ist für die anstehenden Fragestellungen nicht ausreichend. Einerseits lässt sich ein Modell mit Hilfe von schwankenden Grundwasserständen besser kalibrieren und dessen Anpassung an die tatsächlichen Verhältnisse besser beurteilen und andererseits ist es hinsichtlich des Transports des TFA wichtig, die Strömungsverhältnisse und damit die Strömungsrichtungen in der notwendigen zeitlichen Variabilität abbilden zu können. Hinzu kommt, dass mit einem stationären Modell unterschiedliche Entnahmeverhältnisse nur in einzelnen singulären Modellbetrachtungen abbildbar sind und die zeitliche Entwicklung auf den TFA-Transport damit nicht berücksichtigt werden kann. Außerdem hängt der Austausch zwischen Neckar und Grundwasser auch von der hydrologischen Situation und der Abflusssituation im Neckar ab und ist damit entsprechenden Schwankungen unterworfen, die für den TFA-Transport von Bedeutung sind.

Die berechneten Grundwasserströmungsverhältnisse im OGWL bei Mittelwasserverhältnissen sind in Abbildung 5.2 u.a. als Linien gleicher Grundwasserstände (Isolinien) dargestellt. Die Strömungsrichtung des Grundwassers verläuft senkrecht zu den Isolinien.



LUBW

Abbildung 5.2: Berechnete Piezometerhöhenverteilung und Linien gleicher Grundwasserstände bei Mittelwasserverhältnissen im OGWL

Das Grundwasser fließt im großräumigen Maßstab vom Grabenrand nach Westen in Richtung Rhein bzw. Rheinniederung. Der Einfluss des Neckars ist vor allem oberstrom des Seitenkanals Feudenheim bei Ladenburg zu erkennen. Oberhalb der Staustufe findet eine deutliche Infiltration von Neckarwasser in den Grundwasserleiter statt. Unterstrom nimmt der Neckar wieder Grundwasser auf. Beim oberstromigen Kraftwerk Schwabenheim ist die Situation ähnlich, wobei die Exfiltration von Grundwasser in den Neckar hier deutlich geringer ist als am Wehr Feudenheim.

Die Strömungsgeschwindigkeiten sind abhängig vom Gefälle der Grundwasseroberfläche und von den Durchlässigkeitsverhältnissen, die im Rahmen der Modellkalibrierung bestimmt wurden. Sie liegen bei ca. 1 m/d.

5.2 STATIONÄRE GRUNDWASSERBILANZ

Mit Hilfe des Modells lässt sich auch eine Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse im Modellgebiet erstellen. Die Gesamtbilanz ist in Tabelle 5.1 für das ganze Modellgebiet und in Tabelle 5.2 für das Untersuchungsgebiet zusammengestellt. Im gesamten Modellgebiet dominiert auf der Zuflussseite die Grundwasserneubildung aus Niederschlag mit einem Anteil von über 40 % am Gesamtumsatz. Der hauptsächliche Abfluss findet über die Gewässer mit einem Anteil von rd. 65 % am Gesamtumsatz statt. Der Gesamtumsatz erreicht eine Größenordnung von 32 m³/s.

Tabelle 5.1: Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse im gesamten Modellgebiet bei mittleren Verhältnissen in m³/s

m ³ /s	Zuflüsse	Abflüsse
Grundwasserneubildung	13,572	0,693
Austausch mit dem Neckar/Rhein	7,118	2,633
Austausch mit den übrigen Gewässern	4,634	18,579
Seen	0,610	0,610
Entnahmen	0,077	8,593
Randzufluss	3,908	0,000
Weitere Zu- und Abflüsse (Seen, Festpot, PotRand OFG)	2,063	0,874
Gesamt	31,982	31,982

LUBW

Im Untersuchungsgebiet beträgt der Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtzufluss ca. 1/5. Der hauptsächliche Zufluss erfolgt über den Neckar und den Rhein. Dies zeigt auf, warum das Uferfiltrat eine wichtige Rolle bei der TFA-Problematik im Rhein-Neckar-Raum spielt. Auf der Abflussseite hat die Entnahme mit fast 50 % am Gesamtumsatz einen großen Anteil, was auch darauf hinweist, dass ein Großteil der Entnahmen über Uferfiltratwasser gespeist werden. Der Randzufluss ist im Untersuchungsraum mit einer kleinen Bilanzgröße belegt. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Randzufluss eine schwer zu fassende Größe ist, die im vorliegenden Fall als Bilanzgröße aus einer hydrologischen Modellbetrachtung für den an den Grabenrand angrenzenden Raum entwickelt wurde.

Tabelle 5.2: Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse im Untersuchungsgebiet TFA bei mittleren Verhältnissen in m³/s

m ³ /s	Zuflüsse	Abflüsse
Grundwasserneubildung	0,982	0,107
Austausch mit dem Neckar/Rhein	2,242	0,783
Austausch mit den übrigen Gewässern	0,076	1,158
Seen	0,013	0,013
Entnahmen	0,000	1,916
Randzufluss	0,217	0,000
Zu- und Abstrom im Süden und Norden	1,142	0,695
Gesamt	4,672	4,672

LUBW

5.3 INSTATIONÄRE GRUNDWASSERSTÄNDE

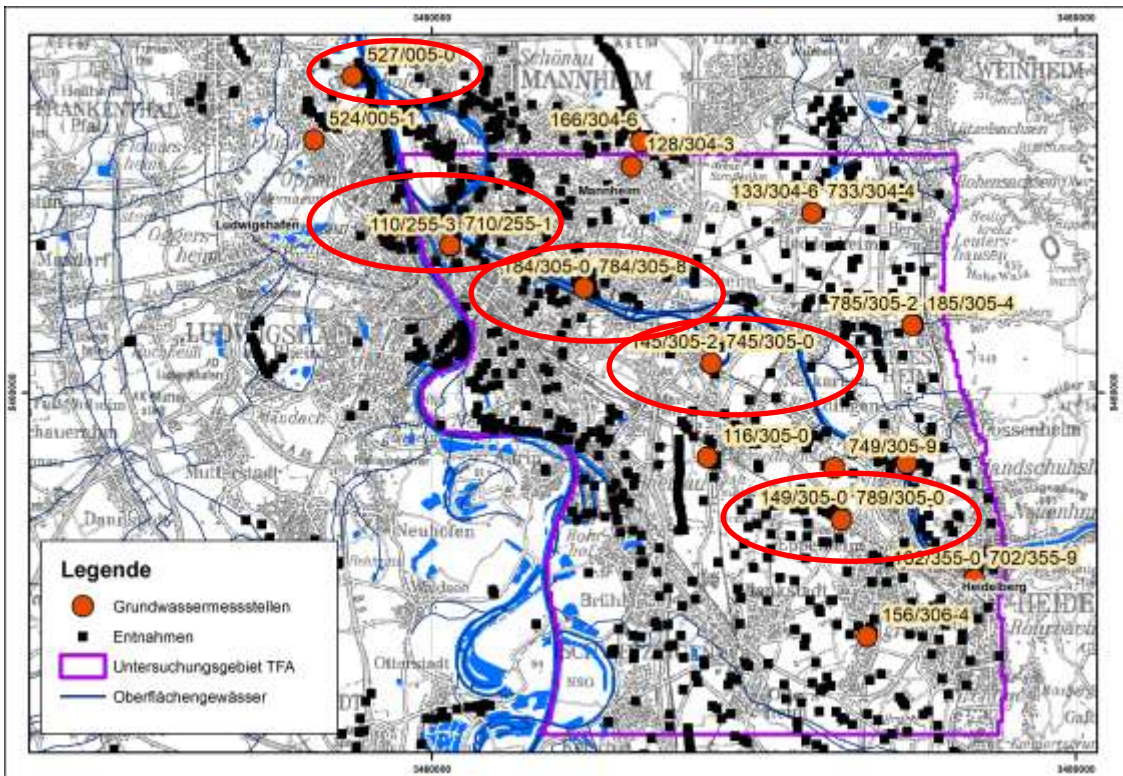
Das Modell ist inzwischen für den Zeitraum 1970 bis 2016 zur Simulation der instationären Strömungsverhältnisse aufgebaut. Es wurde zu Beginn der TFA-Betrachtungen um die Zeitspanne 2009 bis 2016 mit den erforderlichen Randbedingungen fortgeschrieben (vgl. Kap. 4.3). Dabei wurde eine monatsdifferenzierte Zeitschrittunterteilung gewählt, so dass die saisonalen Entwicklungen vom Modell abgebildet werden. Als instationäre Randbedingungen werden die Grundwasserneubildung, die Wasserspiegel des Rheins und des Neckars, die Zuflüsse in das Gewässernetz am Grabenrand sowie die Grundwasserentnahmen in der jeweils zur Verfügung stehenden Datengrundlage angesetzt.

Die Modellkalibrierung wurde im Untersuchungsgebiet TFA durch Anpassung von k_f -Werten (stationäres Modell) sowie von Leakage-Koeffizienten von Rhein und insbesondere Neckar verbessert. In Abbildung 5.4 bis Abbildung 5.12 sind exemplarisch gemessene und berechnete Grundwasserstandsganglinien an ausgewählten Messstellen im Oberen Grundwasserleiter und an Messstellendoubletten dargestellt, die im oberen und mittleren Grundwasserleiter verfiltert sind. Die Grundwasserstände zeigen einerseits ein deutliches saisonales Verhalten mit Grundwasserhochständen im Frühjahr und Grundwassertiefständen im Herbst und andererseits eine mehrjährige Dynamik. Die maximale Schwankungsamplitude liegt bei 2 bis 5 m. Insbesondere in Neckarnähe sind die größten Schwankungsamplituden zu beobachten.

Neben den saisonalen Schwankungen zeigt der Grundwasserstand einen mehrjährigen Gang mit vergleichsweise tiefen Grundwasserständen in der zweiten Hälfte der 1970er-Jahre und in der Mitte der 1990er-Jahre. Grundwasserhochstände werden am Jahresanfang von 2003 erreicht. Danach fallen die Grundwasserstände allerdings aufgrund des im weiteren Verlauf sehr trockenen Jahres 2003.

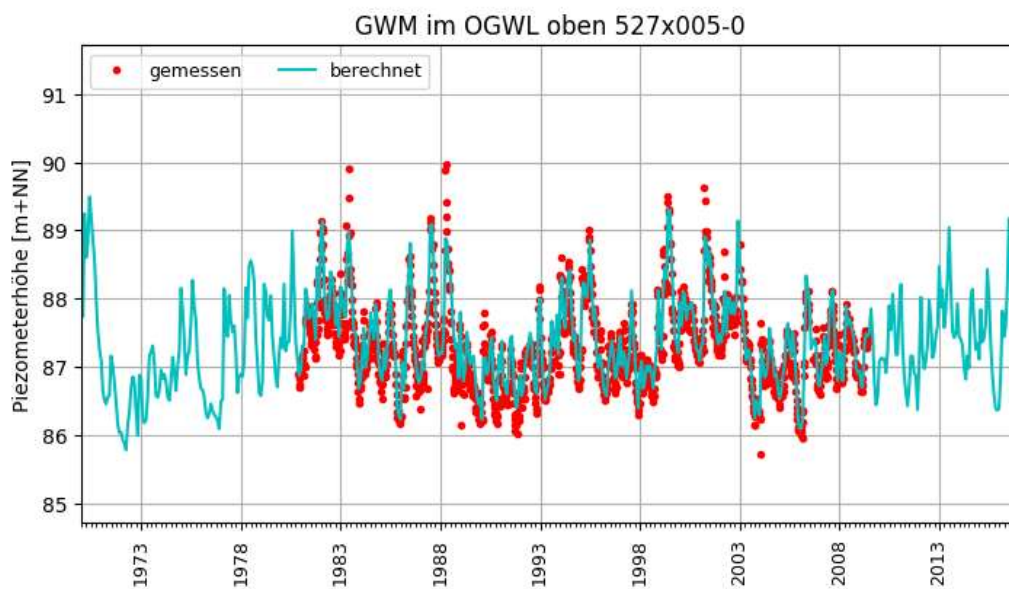
Die mit dem Grundwassermodell berechneten Grundwasserstände reproduzieren die saisonalen und mehrjährigen Schwankungen. Kurzfristige Schwankungen aufgrund von Neckarhochwassern, die mit den wöchentlichen Daten erfasst werden, lassen sich im Grundwassermodell nicht abbilden, da hier nur Monatsmittelwerte berechnet werden.

An der Messstellendoublette 110/255-3 und 710/255-1 ist ein deutlicher Unterschied zwischen Oberem und Mittlerem Grundwasserleiter in den Messwerten zu erkennen. Die Piezometerhöhe im MGWL weist hier in den zurückliegenden 10 Jahren einen deutlichen Anstieg auf, da auf linksrheinischer Seite durch die Technischen Werke Ludwigshafen (TWL) Grundwasserentnahmen vom MGWL in den UGWL verlagert wurden. Dieser generelle Piezometerhöhenunterschied und der unterschiedliche Verlauf in den beiden Grundwasserleitern werden vom Grundwassermodell abgebildet. Auch das Messstellenpaar 184/305-0 und 784/305-8 weist einen Unterschied in den Messwerten zwischen dem Oberen und dem Mittleren Grundwasserleiter auf, der vom Modell gut abgebildet wird. Die oberflächennahe Messstelle zeigt eine deutlich andere Dynamik wie die im Unteren Grundwasserleiter. Auch dies wird vom Modell abgebildet. An den Messstellendoubletten 145/305-2 und 745/305-0 sowie 149/305-0 und 789/305-0 sind keine signifikanten vertikalen Piezometerhöhenunterschiede zu beobachten. Auch dies wird vom Modell abgebildet, ebenso die unterschiedliche Dynamik an der Messstellengruppe 145/305-2 und 745/305-0 mit höherer Dynamik im OGWL.



LW:W

Abbildung 5.3: Lage ausgewählter Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet TFA



LW:W

Abbildung 5.4: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 527/005-0 (1385 Kfr St Ludwigschafen) im OGWL

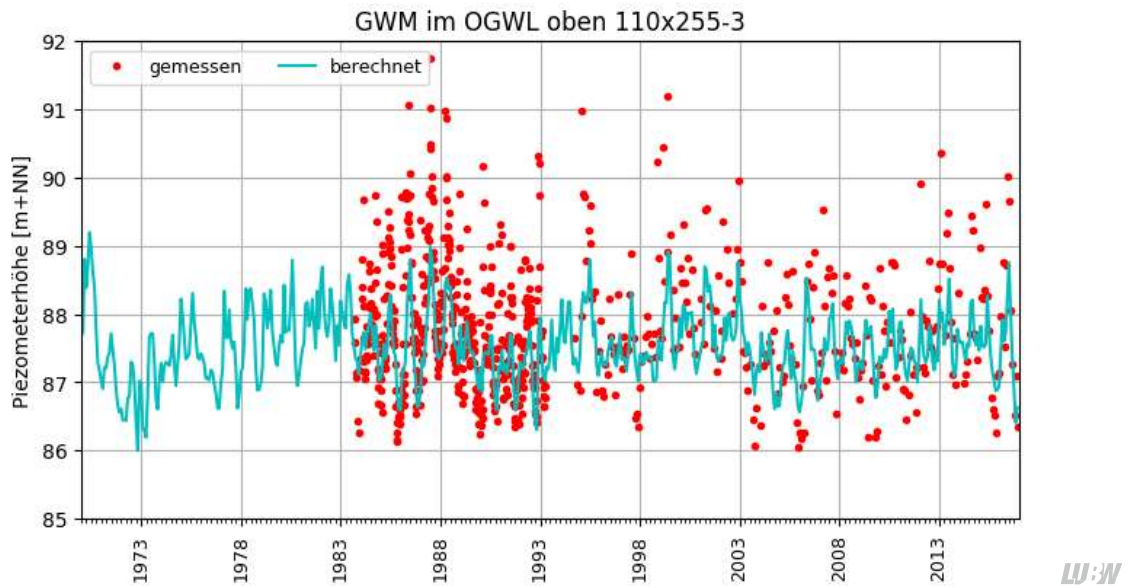


Abbildung 5.5: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 110/255-3 (Ma Handelshafen) im OGWL

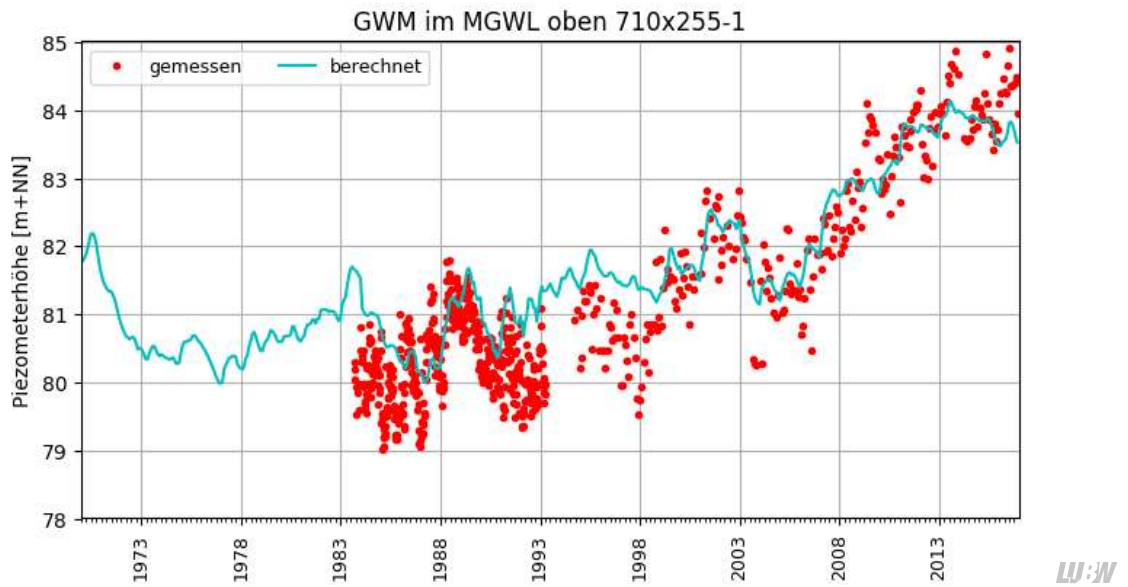


Abbildung 5.6: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 710/255-1 (Ma Handelshafen) im MGWL oben

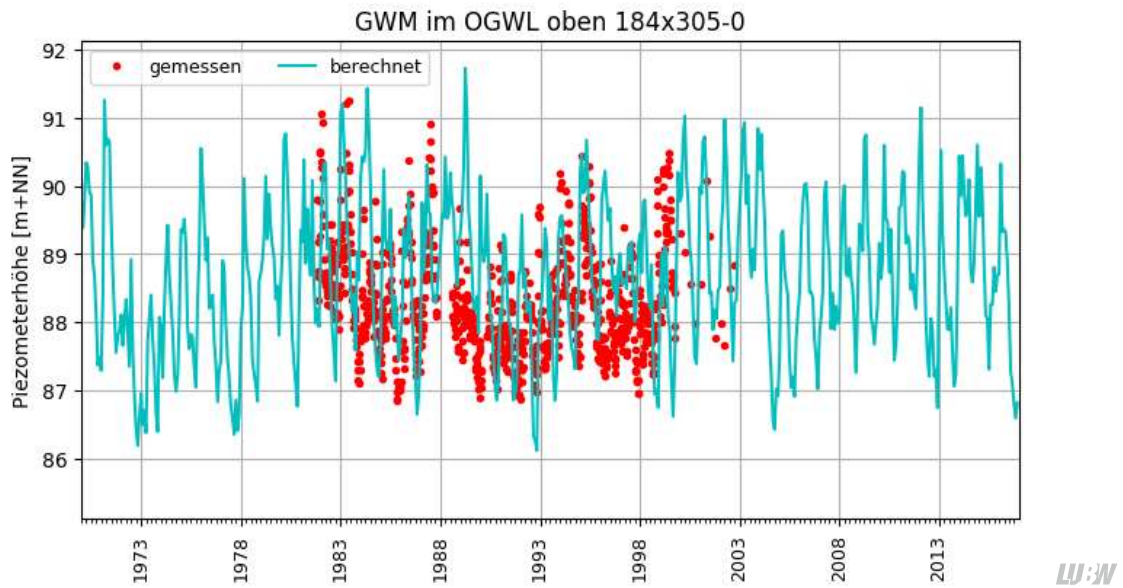


Abbildung 5.7: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 184/305-0 (WK 259o Feudenheim) im OGWL

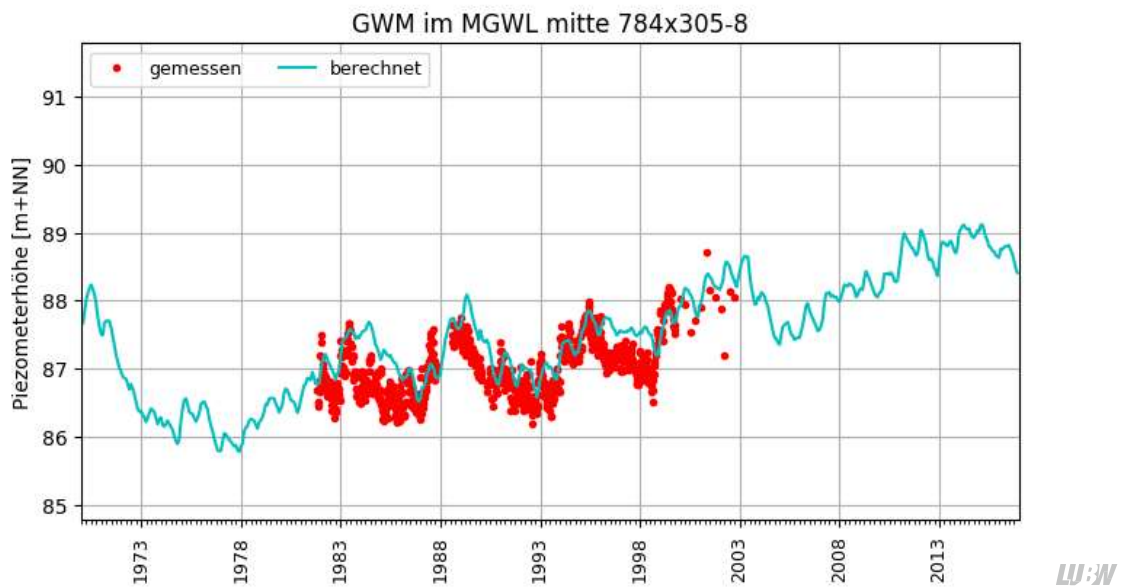


Abbildung 5.8: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 784/305-8 (WK 259u Feudenheim) im MGWL unten

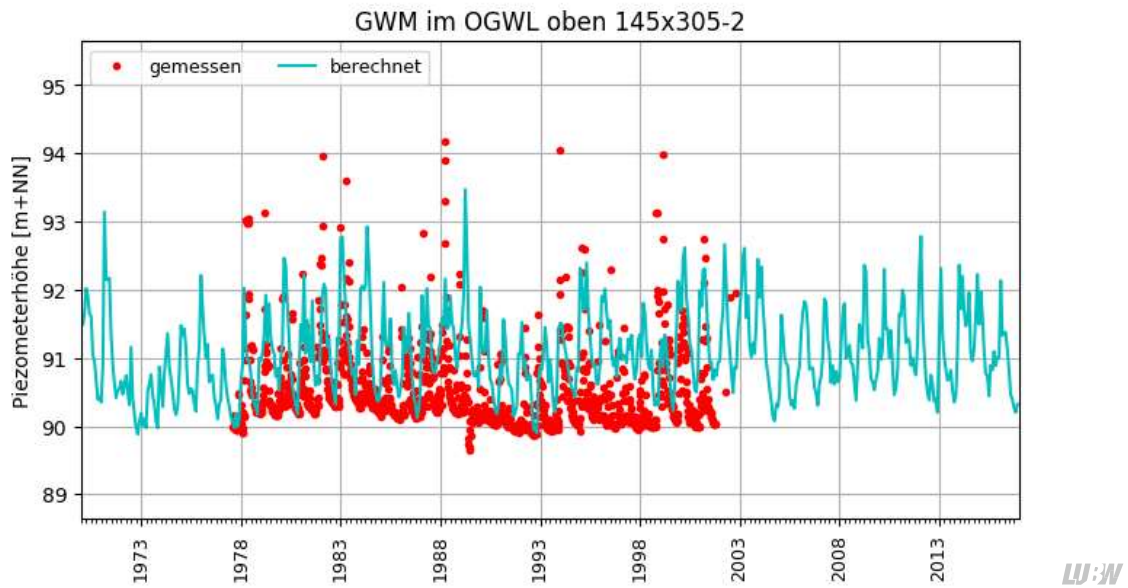


Abbildung 5.9: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 145/305-2 (WR 182u Seckenheim) im OGWL

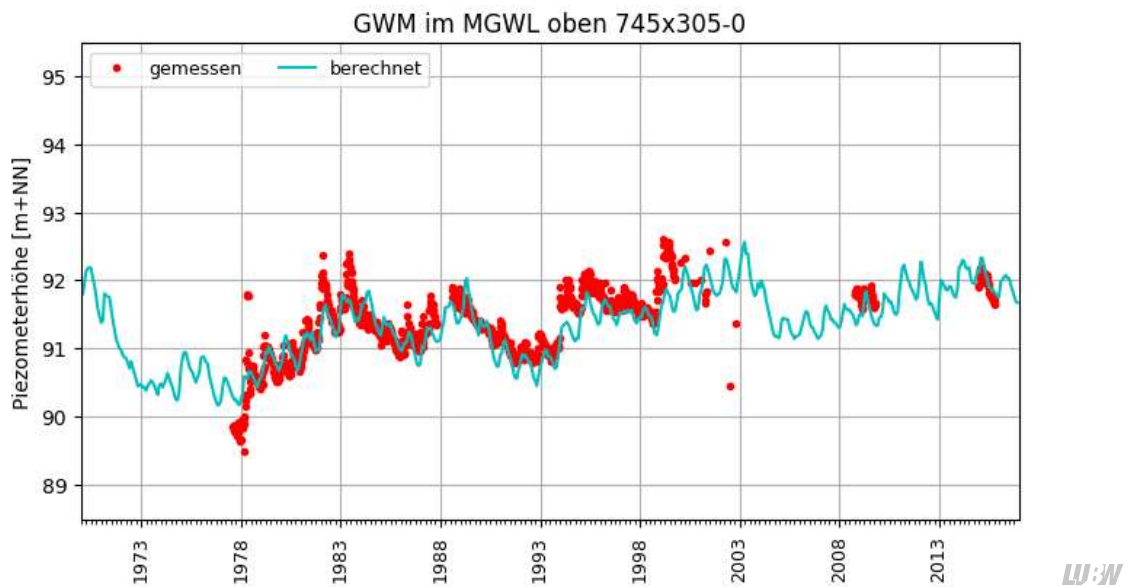


Abbildung 5.10: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 745/305-0 (WR 182u Seckenheim) im MGWL oben

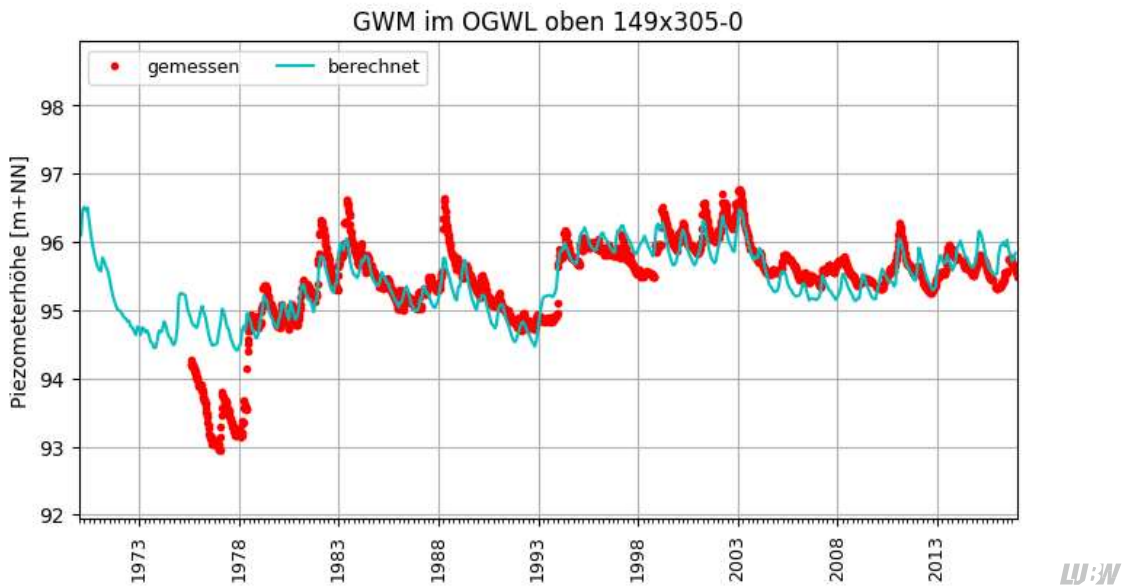


Abbildung 5.11: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 149/305-0 (NG/o Edingen) im OGWL

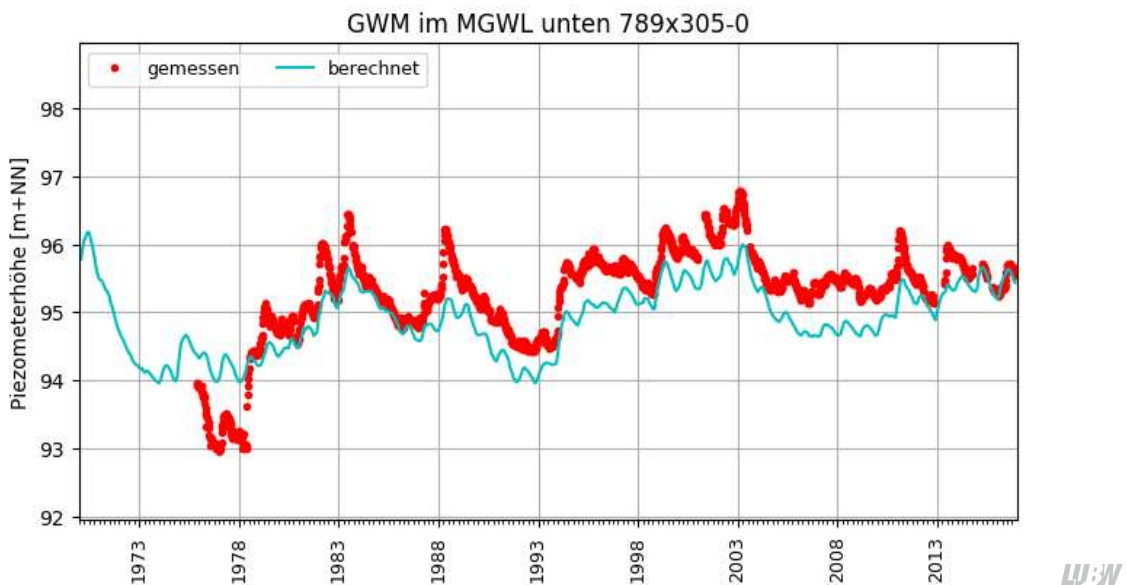


Abbildung 5.12: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 789/305-0 (NG/u Edingen) im MGWL unten

5.4 INSTATIONÄRE GRUNDWASSERBILANZ

Mit Hilfe des instationären Grundwassermodells (vgl. Kap. 4.3) lassen sich die wesentlichen instationären Bilanzkomponenten ermitteln. Für das gesamte Modellgebiet zwischen Karlsruhe und Worms ist die summarische Gesamtbilanz zwischen 1970 und 2016 in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Gesamtbilanz schwankt

zwischen 25 und 150 m³/s. Die größte Zuflusskomponente ist die Grundwasserneubildung, deren zeitliche Entwicklung in Abbildung 5.14 dargestellt ist. Die geringsten Neubildungsraten in den Sommermonaten liegen bei näherungsweise Null für das gesamte Modellgebiet. In diesen Zeiträumen erreicht die Verdunstung aus dem Grundwasserleiter Maximalwerte von wenigen m³/s. Die maximalen monatlichen Neubildungsraten liegen bei 80 bis 90 m³/s. Über den Rhein und den Neckar fließen dem Grundwasserleiter von wenigen m³/s bis maximal 100 m³/s zu (siehe Abbildung 5.16). Die hauptsächliche Abflusskomponente im gesamten Modellraum, ist das feinmaschige Gewässernetz mit maximalen Grundwasserzuflüssen von bis zu 100 m³/s (siehe Abbildung 5.15).

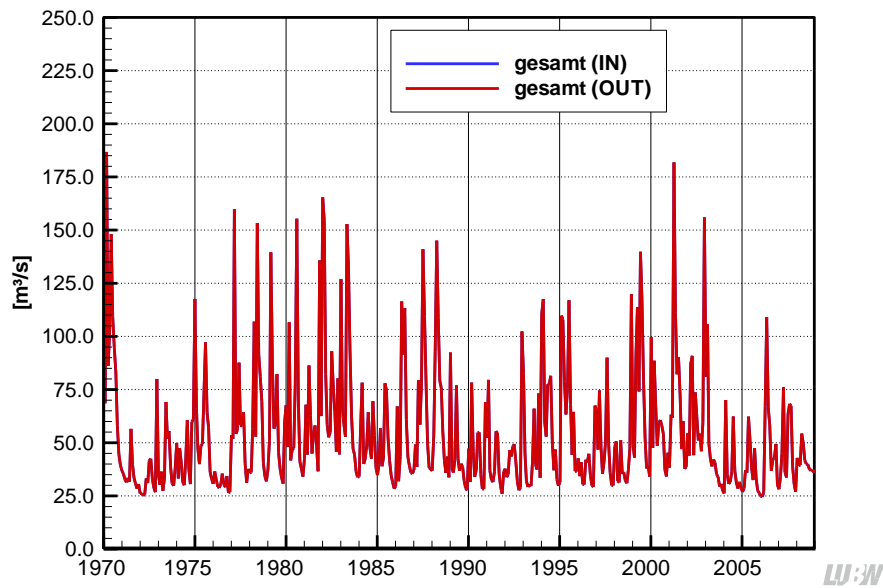


Abbildung 5.13: Instationäre Gesamtbilanz (Zu- und Abfluss sind identisch) zwischen 1970 und 2016

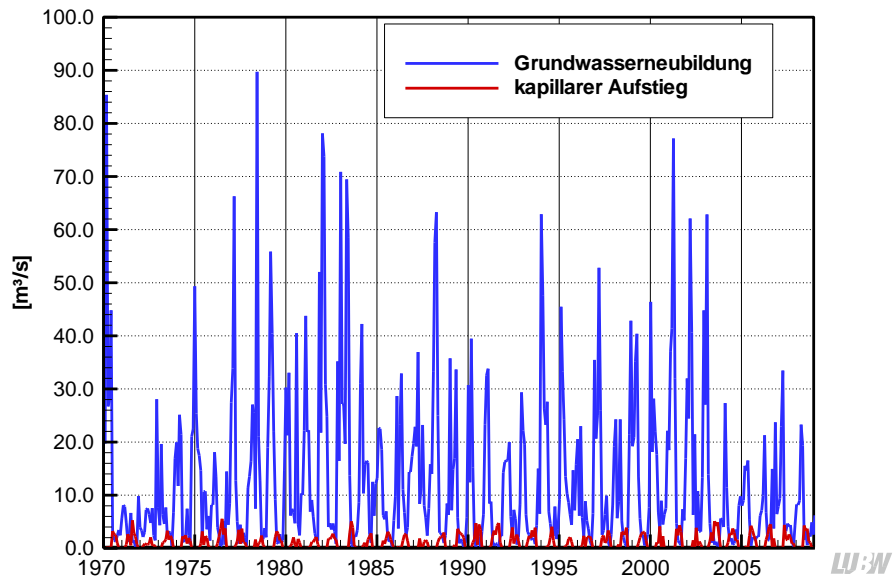


Abbildung 5.14: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung und des kapillaren Aufstiegs zwischen 1970 und 2016

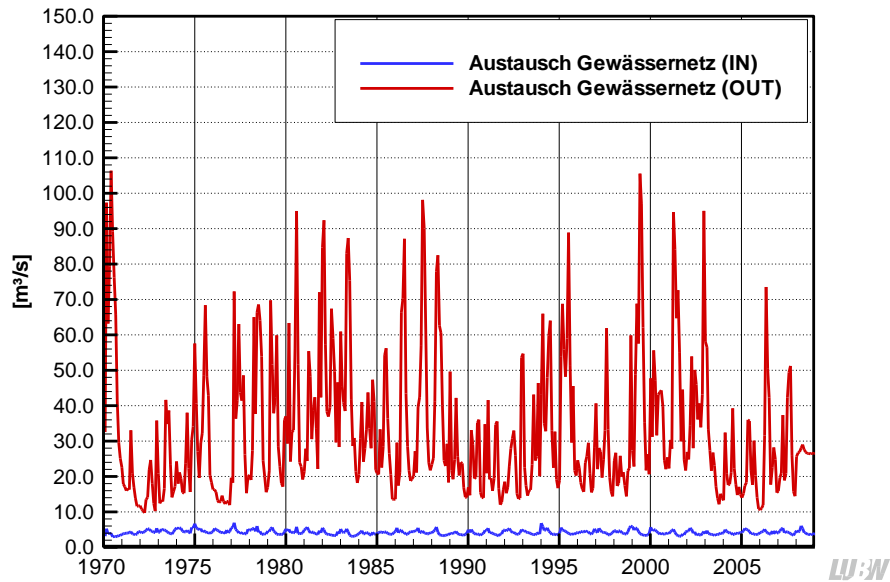


Abbildung 5.15: Zeitliche Entwicklung des Austausches zwischen Grundwasser und Gewässernetz zwischen 1970 und 2016

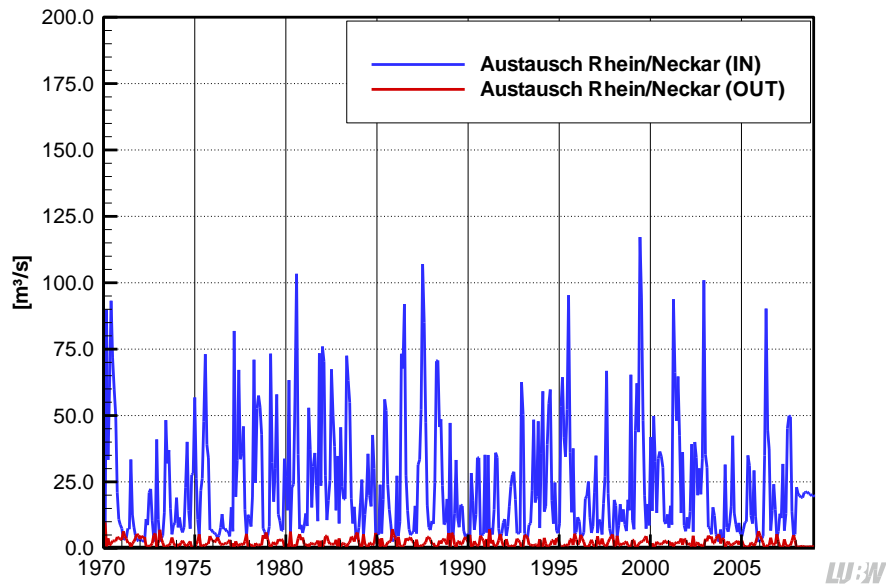


Abbildung 5.16: Zeitliche Entwicklung des Austausches zwischen Rhein und Neckar mit dem Grundwasser zwischen 1970 und 2016

Neben den instationären Grundwasserbilanzen für das Gesamtmodell wurden für den Rhein-Neckar-Raum die wesentlichen Bilanzgrößen Grundwasserneubildung, Entnahmen und Neckarinfiltration im Zeitraum 1999 bis 2016 ausgewertet. Diese sind in Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.19 zusammengestellt. Die Grundwasserneubildung erreicht maximale Raten von bis zu 3 m³/s. Die Neckarinfiltration schwankt zwischen 0 m³/s und 2 m³/s. Die Entnahmeraten liegen in der Größenordnung von 0,7 m³/s bis 1,0 m³/s.

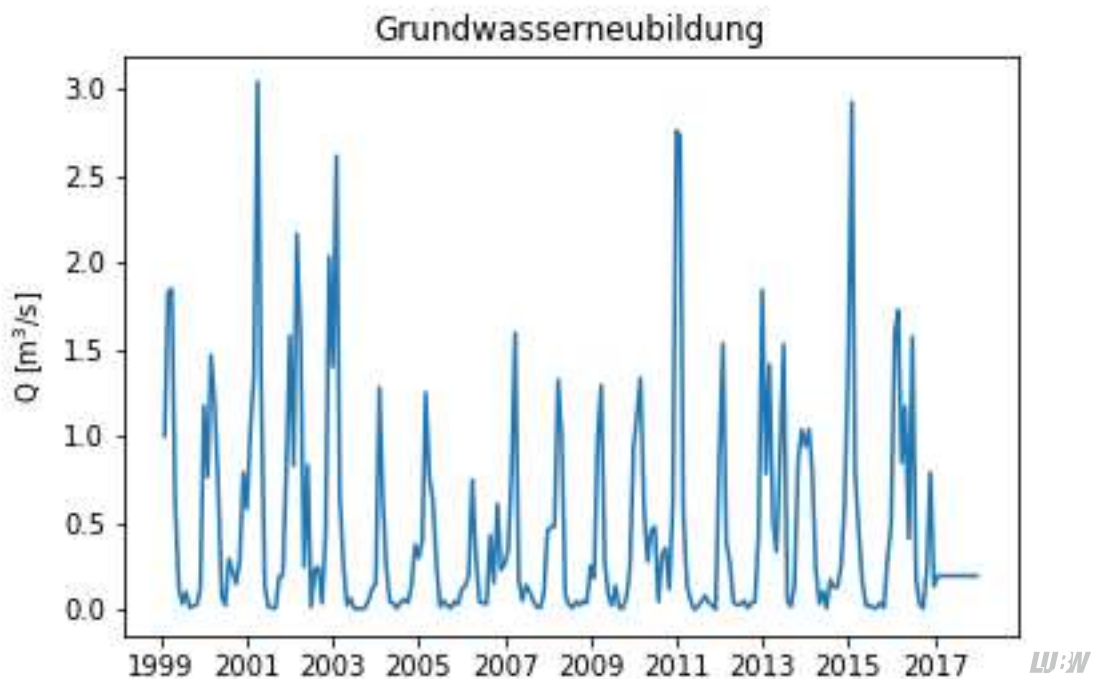


Abbildung 5.17: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum

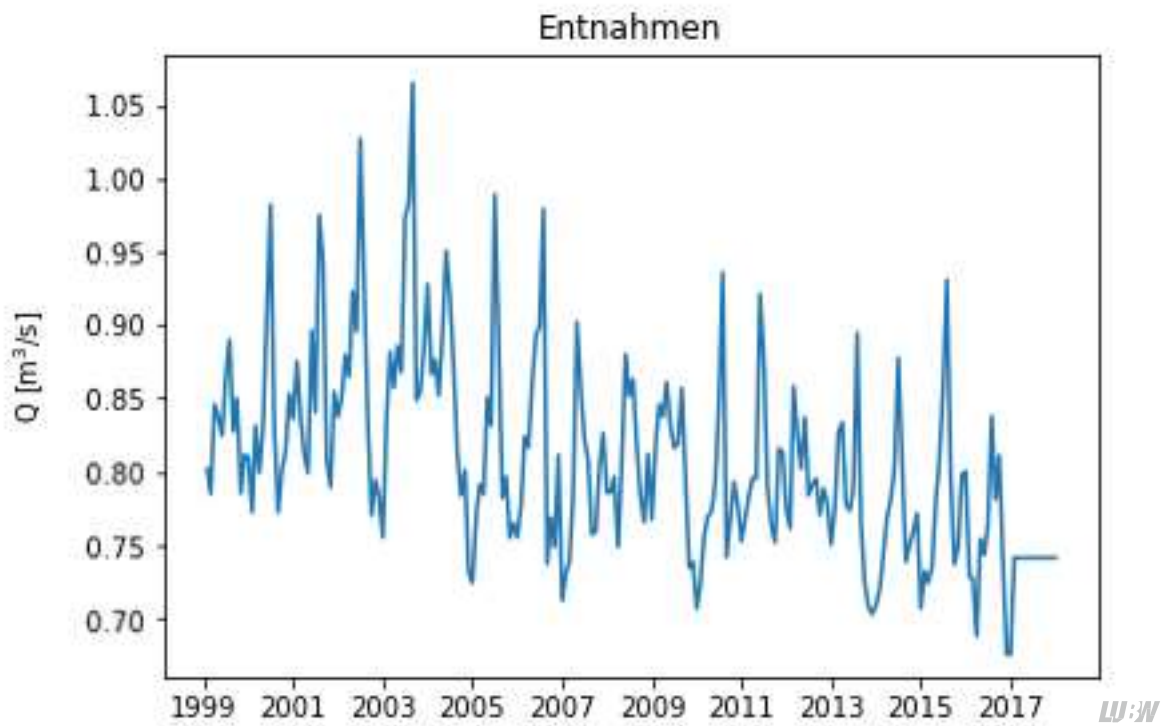


Abbildung 5.18: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserentnahmen zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum

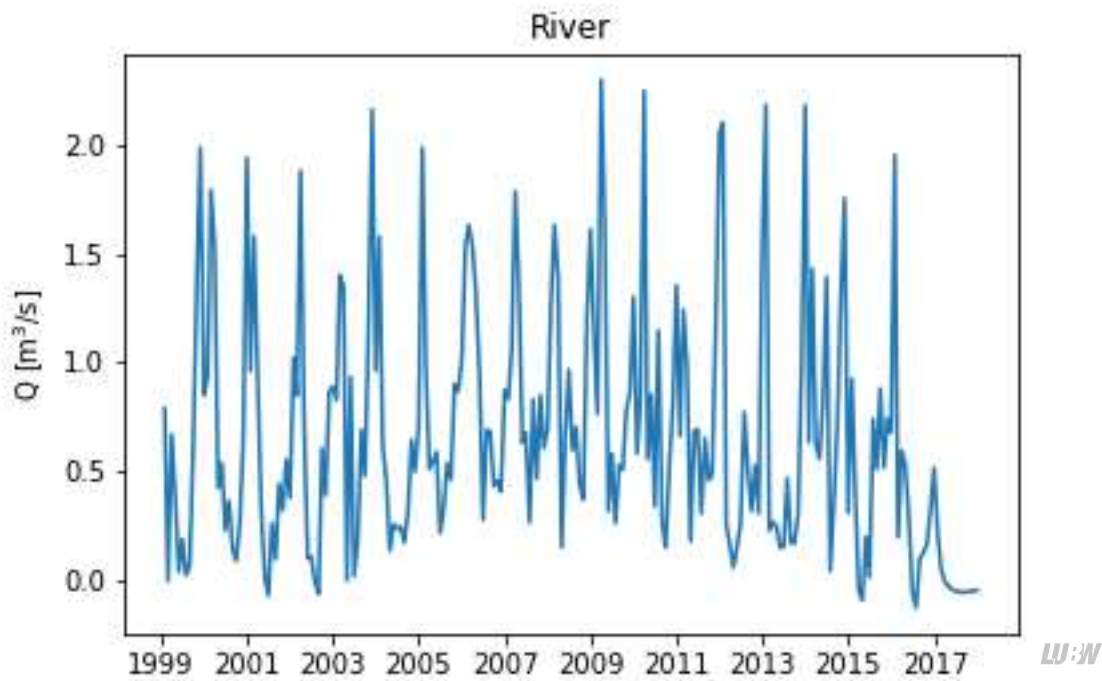


Abbildung 5.19: Zeitliche Entwicklung der Neckarinfiltration zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum

6 Überprüfung der Kalibrierung anhand von Chloriddaten und Analyse Neckaruferfiltrat

6.1 CHLORIDEINTRAG

Die Fragestellungen im Zusammenhang mit der TFA-Problematik beziehen sich hauptsächlich auf die Austauschvorgänge zwischen Neckar und Grundwasser. Die Strömungskalibrierung insbesondere mit instationären Randbedingungen liefert hier Hinweise zur Anbindung des Neckars an den Grundwasserleiter. Eine Überprüfung des Neckaruferfiltratanteils ist aber zusätzlich notwendig, um die Modellbetrachtung im Zusammenhang mit dem Transport von TFA aus dem Neckar abzusichern. Hierzu sind Informationen bzw. Messdaten notwendig, um die Signatur des Neckarwassers im Grundwasser identifizieren zu können. Prinzipiell eignen sich alle Wasserinhaltsstoffe, die im Neckar in anderer Konzentration wie im Grundwasser vorkommen. Allerdings müssen hierfür auch entsprechende Messinformationen aus der Vergangenheit vorhanden sein und die Parameter sollten zur eindeutigen Identifizierung einem so genannten konservativen Transport ohne Abbau oder Sorption unterliegen. Dies ist für Chlorid der Fall.

Auf Grund des Salzbergbaus im Raum Heilbronn wies der Neckar in der Vergangenheit deutlich erhöhte Chloridwerte auf. Hinzu kommt, dass Chlorid ein Standardparameter bei der Erfassung der Grundwasserqualität ist und damit an vergleichsweise vielen Grundwassermessstellen im Untersuchungsraum Chloridwerte vorliegen. Auch wurde die Chloridkonzentration im Neckar seit 1972 mit monatlichen Messwerten erfasst. Dadurch ergibt sich eine sehr gute Datengrundlage, um den mit dem Modell berechneten Austausch zwischen Neckar und Grundwasser zu überprüfen. In Abbildung 6.1 ist die gemessene Chloridkonzentration des Neckars in Neckargmünd dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass die Chloridkonzentration bis Ende 1993 auf einem höheren Niveau lag als danach. Die durchschnittliche Chloridkonzentration des Neckars vor 1994 betrug ca. 120 mg/l. Nach dem Rückgang der Einleitung aus der Kaliindustrie liegt die mittlere Chloridkonzentration noch bei ca. 50 mg/l. In beiden Phasen liegt die Chloridkonzentration deutlich unter dem Trinkwassergrenzwert von 250 mg/l.

Der Verlauf der Chloridkonzentration im Neckar zeigt einen deutlichen saisonalen Einfluss. Dieser resultiert aus den saisonalen Abflussschwankungen des Neckars. Insbesondere bei niedrigen Abflüssen kommt es auf Grund der näherungsweise konstant eingeleiteten Chloridfracht zu Spitzen in der Chloridkonzentration, die meist im Sommerhalbjahr auftreten.

Neben dem Chlorideintrag über den Neckar wurde ein flächiger Chlorideintrag aus der Landwirtschaft berücksichtigt. Dafür wurden gemessene Chloridkonzentrationen außerhalb des Einflussbereichs des Neckars analysiert. Dabei hat sich gezeigt, dass der flächenhafte Chlorideintrag über die Grundwasserneubildung in der Größenordnung von 30 mg/l liegen muss. Da diese Konzentration als Mittelwert an einigen Grundwassermessstellen und Entnahmen beobachtet wird, wurde dieser Wert unabhängig von der jeweiligen Landnutzung für die flächenhafte Grundwasserneubildung angesetzt. Außerdem wurde angenommen, dass der Chlorideintrag über andere Oberflächengewässer mit einer Konzentration von 20 mg/l erfolgt. Einen zusätzlichen Chlorideintrag aus der Straßensalzung wurde nicht angesetzt, da dieser nur lokal eine Rolle spielt und nur vereinzelt an Grundwassermessstellen z.B. direkt neben Autobahnen zu beobachten ist.

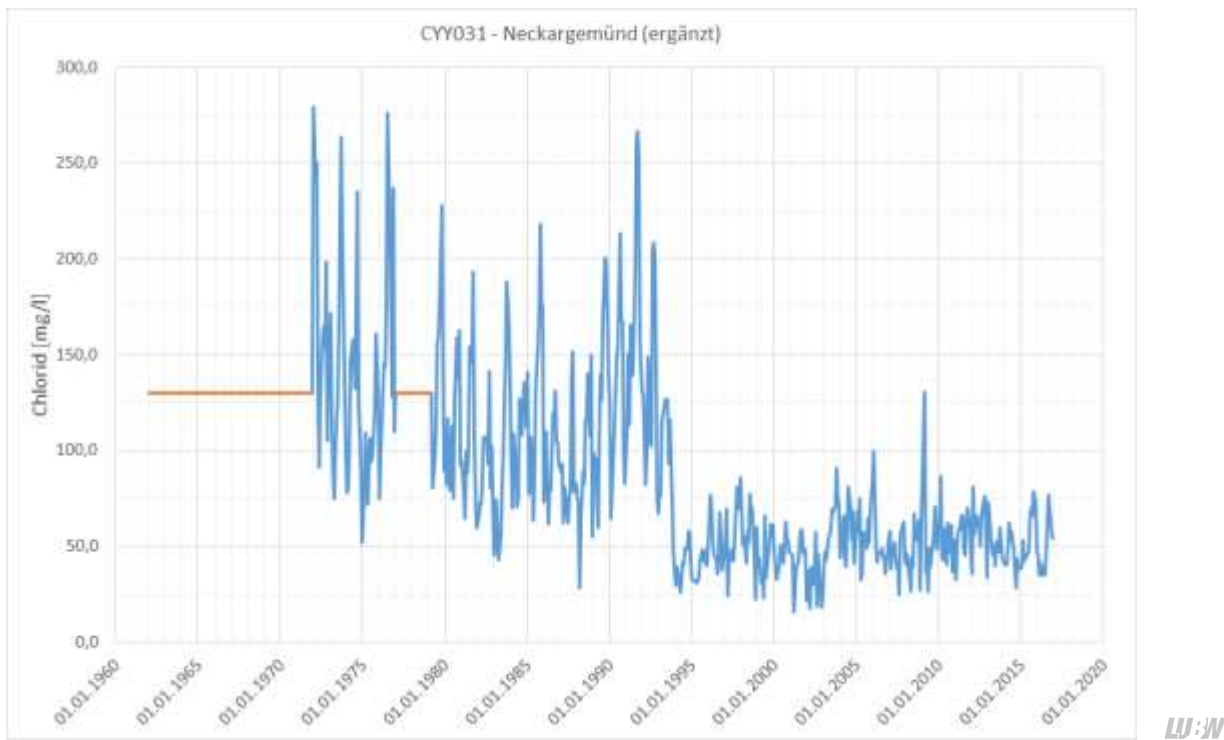


Abbildung 6.1: Gemessene Chloridkonzentration im Neckar an der Messstelle Neckargemünd mit ergänzten Daten (siehe orangene Linie)

6.2 CHLORIDTRANSPORT

Im instationären Grundwassermodell wurde der Transport von Chlorid aus dem Neckar implementiert. Dabei wurde die gesamte Zeitspanne von 1970 bis 2016 betrachtet. Die instationäre Strömung wurde auf Monatsbasis berücksichtigt und der Eintrag von Chlorid aus dem Neckar variiert ebenfalls auf Monatsbasis entsprechend Abbildung 6.1. Die Simulation des Chloridtransports erfolgt aus numerischen Gründen mit Zeitschrittlängen von 10 Tagen. Da die maximalen Chloridkonzentrationen mit unter 300 mg/l vergleichsweise gering sind, sind keine dichtegetriebenen Strömungseffekte zu erwarten. Der Chloridtransport kann deshalb unter der Annahme eines konservativen Markierungsstoffes nur unter Berücksichtigung der advektiven und dispersiven Transportprozesse erfolgen.

Im Rahmen der stationären und instationären Strömungskalibrierung wurden die Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters und Leakagefaktoren der Oberflächengewässer auf Basis der hydrogeologischen Basisinformationen bestimmt bzw. so eingegrenzt, dass eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen vorhanden ist. Beim hier relevanten Transport von konservativen Wasserinhaltsstoffen werden als zusätzliche Parameter der durchflusswirksame Hohlraumanteil und die Dispersivitäten in Längs- und Querrichtung benötigt. Hierfür liegen aus dem Untersuchungsraum keine gemessenen Informationen vor. Aus Literaturangaben und ähnlichen Modelluntersuchungen lassen sich folgende Wertebereiche für diese Parameter abschätzen:

- Durchflusswirksame Porositäten: 10 bis 20 % (LUBW, 2017)
- Dispersivitäten: nach Gelhar et al (1992)
 - in Längsrichtung: 10 bis 100 m
 - in Querrichtung: 1 bis 10 m

Bei den Dispersivitäten ist zu beachten, dass hier auch die numerische Dispersion die hydrodynamische Dispersion im Grundwassermodell überlagert. Die numerische Dispersion ist dabei abhängig von der räumlichen Auflösung im Grundwassermodell. Diese beträgt 100 m in horizontaler Richtung. Damit ist eine numerische Dispersion in der Größenordnung von einigen 10er % der Diskretisierung zu erwarten und die numerische Dispersion liegt somit in der Größenordnung der aus der Literatur abgeleiteten Werte.

Beispielhaft sind die Modellergebnisse des Chloridtransports für repräsentative Messstellen in Abbildung 6.2 bis Abbildung 6.8 dargestellt. Bei diesen Modellbetrachtungen wurden Porositäten zwischen 10 und 20 % gewählt und eine Längsdispersivität von 50 m sowie eine Querdispersivität von 5 m angesetzt. Der Vergleich mit den Messwerten zeigt, dass sich die Größenordnung des durchflusswirksamen Hohlraumanteils nicht eindeutig identifizieren lässt. Anhand der gemessenen Chloridkonzentrationen lässt sich jedoch die Bandbreite der Porosität zwischen 10 und 20 % eingrenzen. Generell scheint es so zu sein, dass die neckarnahen Messstellen mit den Brunnen von Edingen Neckarhausen eine bessere Anpassung für die Obergrenze der Porosität mit 20 % aufweisen, am Wasserwerk Rauschen eine Porosität von 15 % adäquat erscheint und für den Bereich des Wasserwerks Rheinau keine eindeutige Zuordnung möglich ist.

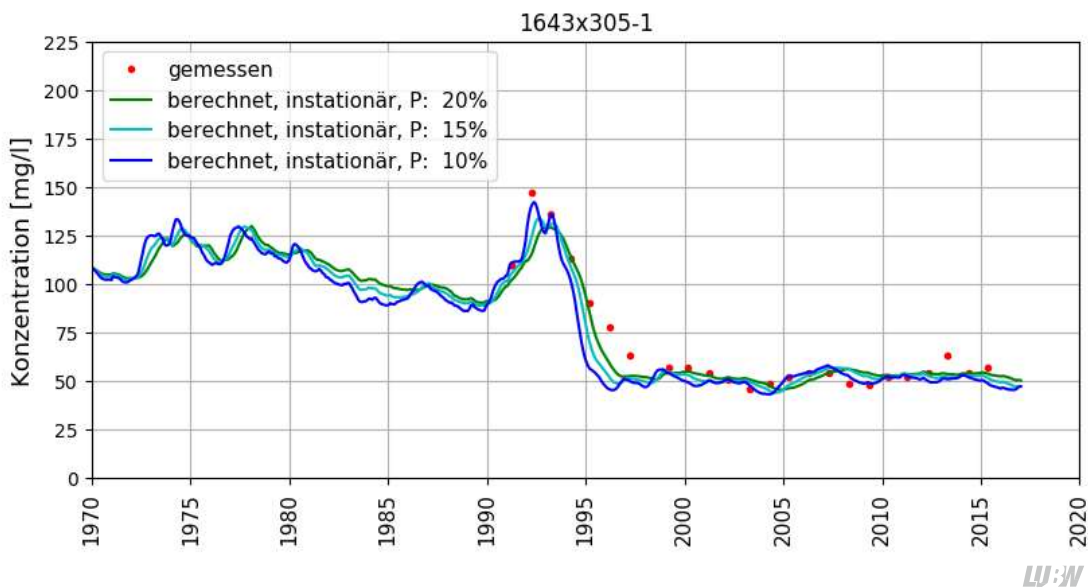


Abbildung 6.2: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 1 des Wasserwerks Edingen I

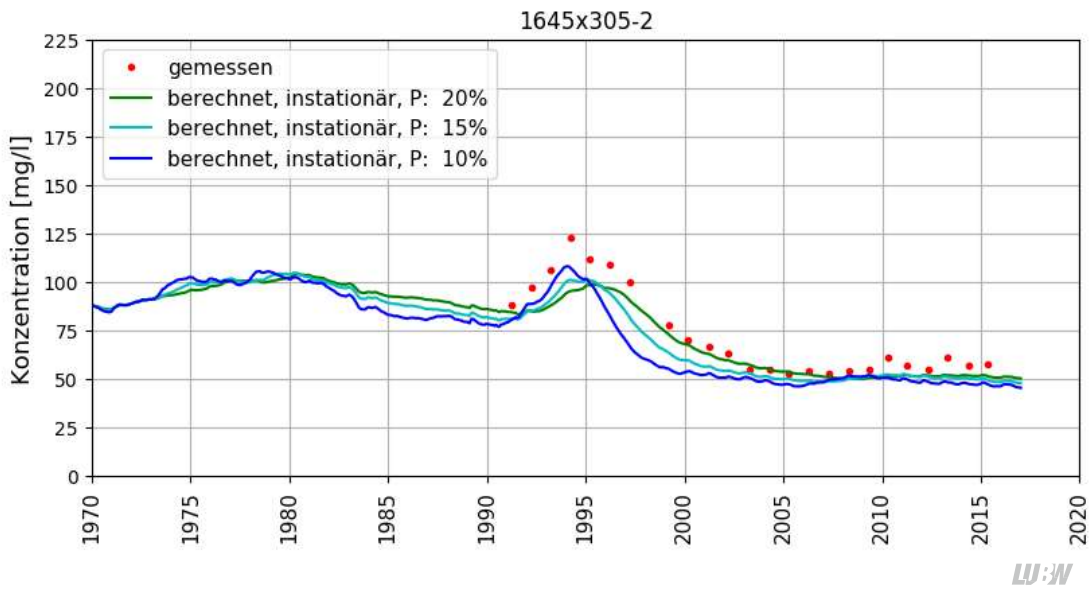


Abbildung 6.3: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 2 des Wasserwerks Edingen II

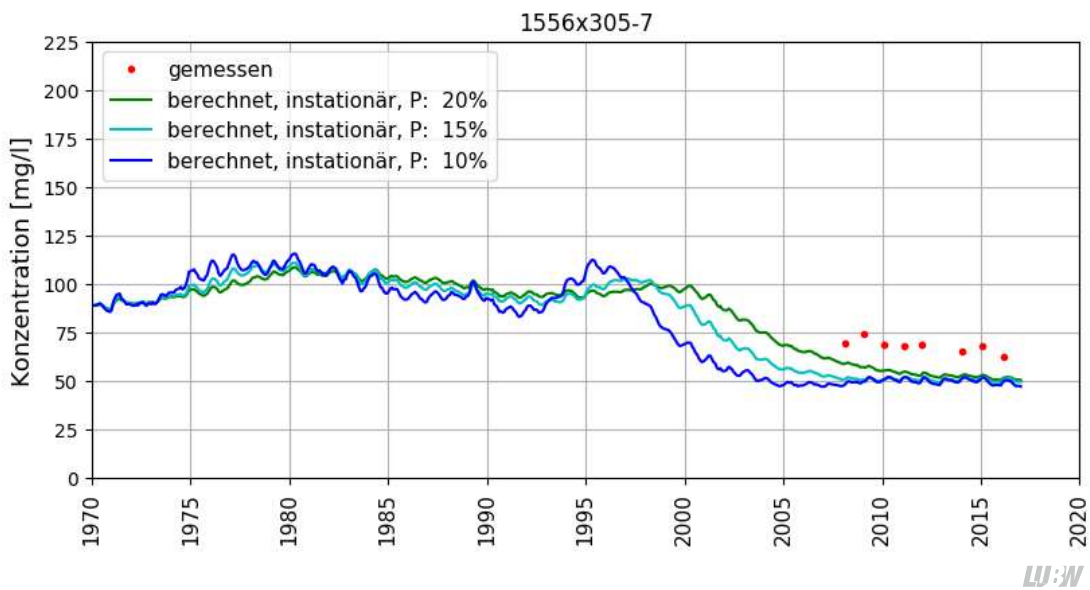


Abbildung 6.4: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 2 des Wasserwerks Seckenheim

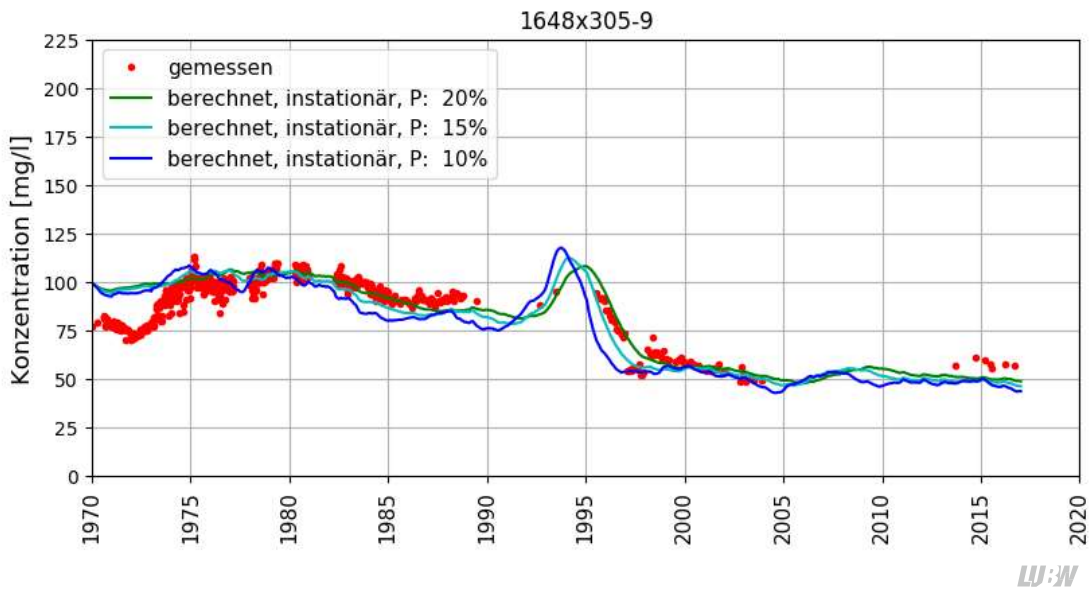


Abbildung 6.5: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 1 des Wasserwerks Rauschen

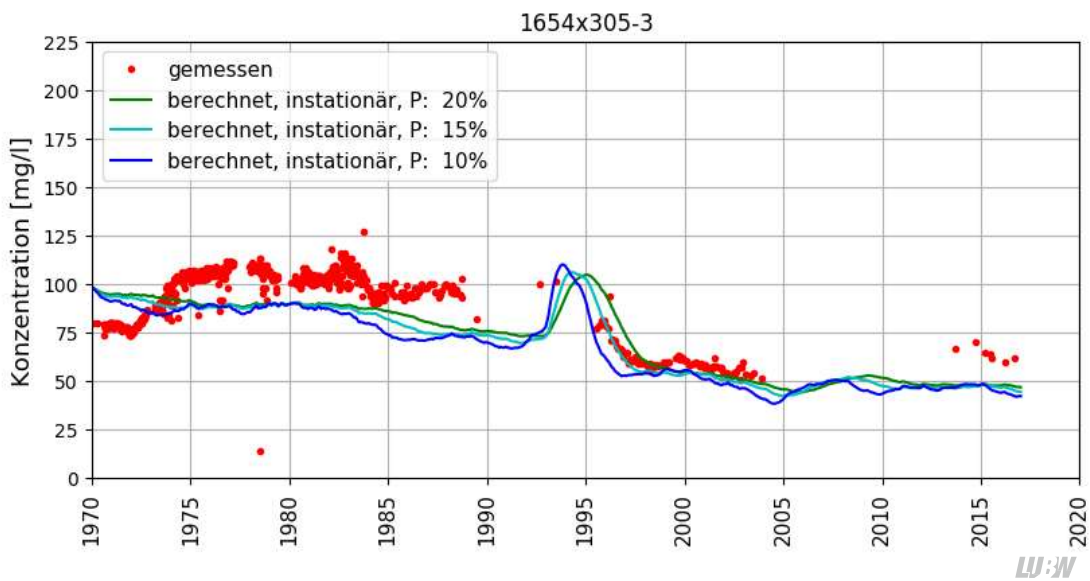


Abbildung 6.6: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 7 des Wasserwerks Rauschen

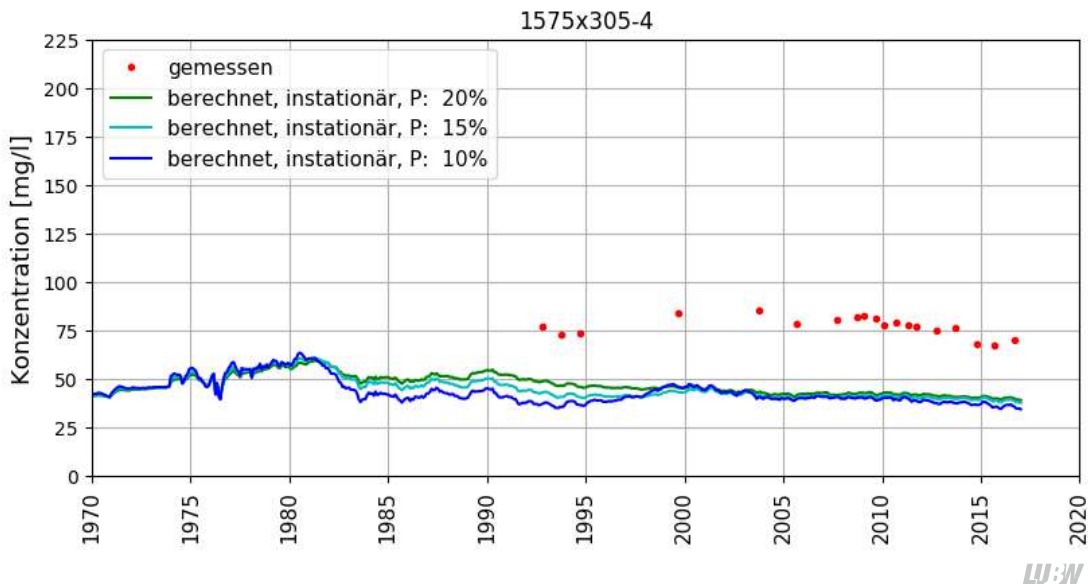


Abbildung 6.7: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 49 des Wasserwerks Rheinau

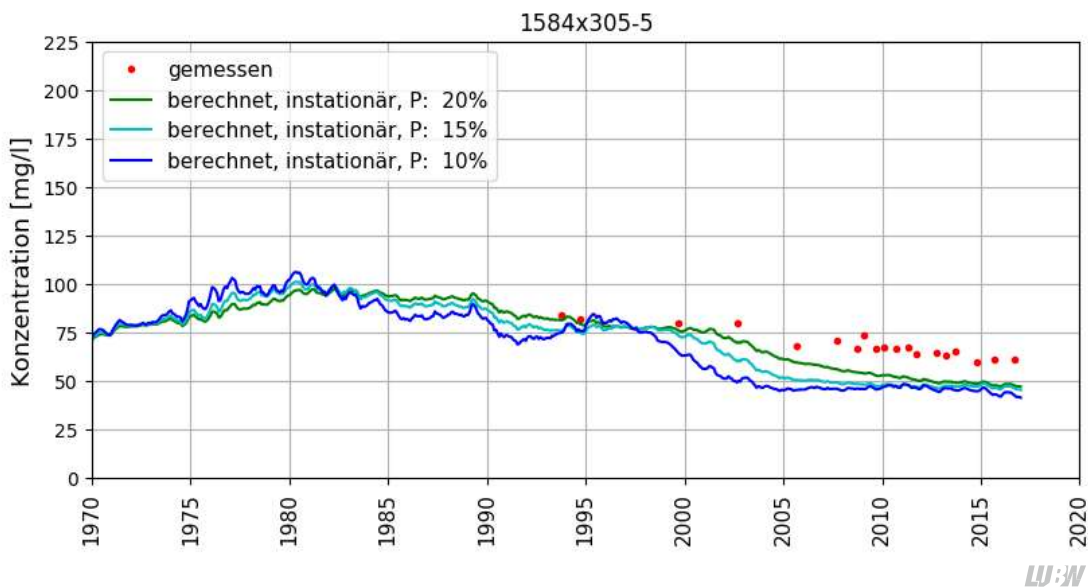


Abbildung 6.8: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 58 des Wasserwerks Rheinau

6.3 ANALYSE DER AUSBREITUNG VON NECKARUFERFILTRAT

Um eine Vorstellung und Einschätzung der Ausbreitung von TFA-haltigem Neckarwasser im Grundwasserleiter zu haben, wurden Simulationen mit markiertem Neckaruferfiltrat durchgeführt. Dies gibt Hinweise wie groß der Anteil von Neckarwasser im Grundwasserleiter und den zur Trinkwasserversorgung genutzten Brunnen ist. Außerdem lässt sich abschätzen, wie groß die Laufzeiten zwischen Neckar und einzelnen Brunnen sind. Folgende Modellbetrachtungen wurden hierzu durchgeführt:

- Stoßartige Markierung des Neckaruferfiltrats über einen Monat und Simulation des Transports bei stationärem Strömungsfeld über 10 Jahre

- Kontinuierliche Markierung des Neckaruferfiltrats und Simulation des Transports bei instationärem Strömungsfeld über 47 Jahre zwischen 1970 und 2016

Die stoßartige Markierung des Neckaruferfiltrats über einen Monat gibt Auskunft über die Laufzeit zwischen Neckar und einem Brunnen oder einer Grundwassermessstelle im Abstrom. Beispielhaft sind in nachfolgenden Abbildungen repräsentative Durchbruchkurven von Neckaruferfiltrat an Brunnen mit unterschiedlicher Entfernung zum Neckar dargestellt. Dabei wurden Hohlraumanteile von 10 und 15 % angesetzt. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Erstankunftzeit zu und gleichzeitig nimmt der maximale Anteil ab. Außerdem verflacht sich die Durchbruchganglinie, so dass bei großer Entfernung geringe Anteile von Neckarwasser entsprechend lange an den Brunnen zu beobachten sind. Generell führt eine höhere Porosität zu einer Verlangsamung der Strömung und damit zu einem späteren Ankommen des Maximums gegenüber der Simulation mit kleiner Porosität. Auch fällt die Maximalkonzentration bei großer Porosität geringer aus als bei kleiner Porosität. Im Hinblick auf einen stoßartigen Eintrag ist damit die kleine Porosität als ungünstig anzusehen.

Bei den Simulationen mit instationärem Strömungsfeld mit kontinuierlich markiertem Neckarwasser wurde ein durchflusswirksamer Hohlraumanteil von 15 % angesetzt, da bei der kontinuierlichen Markierung der Hohlraumanteil eine untergeordnete Rolle spielt. Die Längsdispersivität wurde zu 50 m und die Querdispersivität in horizontaler Richtung zu 5 m angenommen. In vertikaler Richtung wurde eine Querdispersivität von 0,5 m angesetzt. Die Auswertung der ausgewählten Brunnen zeigt, dass der Anteil an Uferfiltrat auch von den hydrologischen Verhältnissen abhängt. So ist ein saisonaler und mehrjähriger Verlauf des Uferfiltratanteils zu erkennen. Diese hydrologisch bedingte Variation liegt in der Größenordnung von 10 bis 20 %.

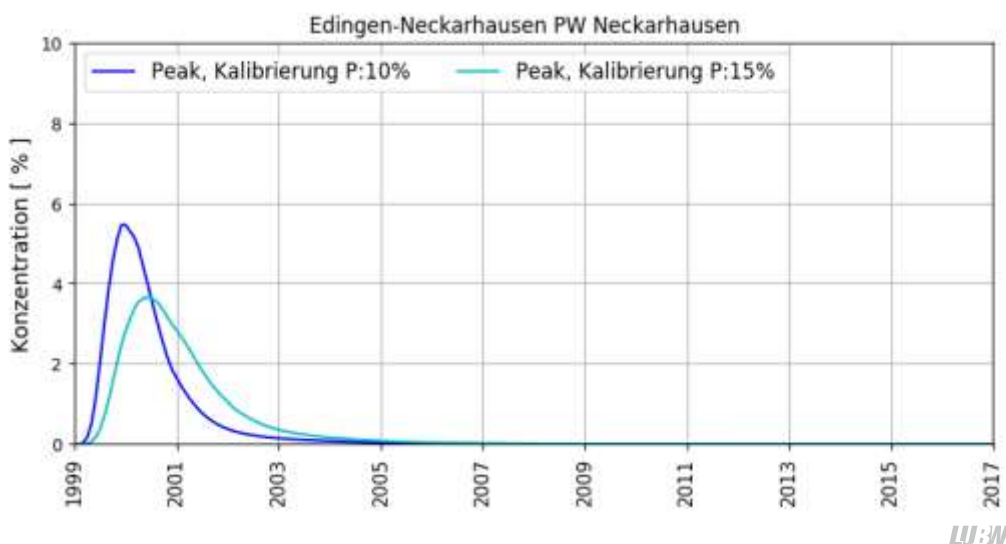


Abbildung 6.9: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen PW Neckarhausen von Edingen-Neckarhausen

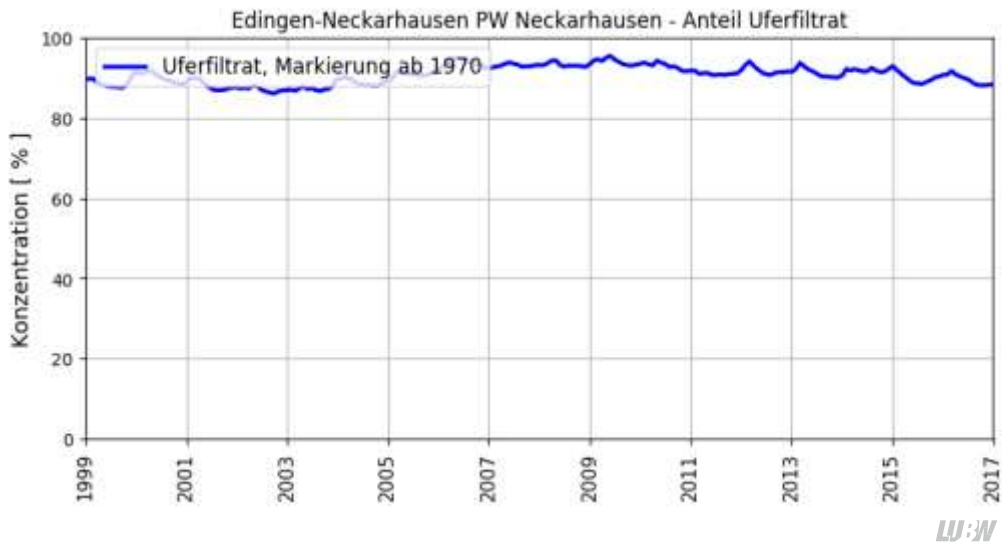


Abbildung 6.10: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am PW Neckarhausen von Edingen-Neckarhausen

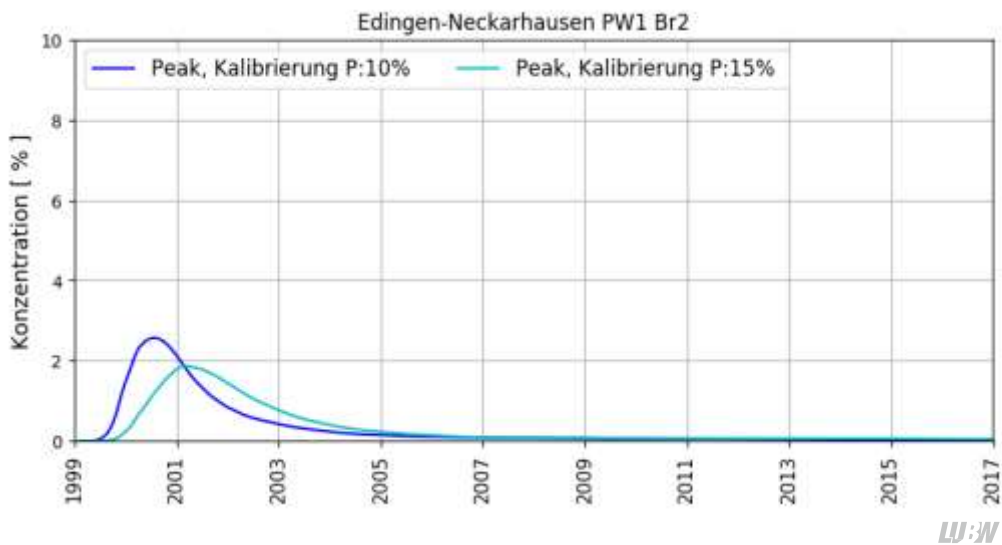


Abbildung 6.11: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 2 des PW1 von Edingen-Neckarhausen

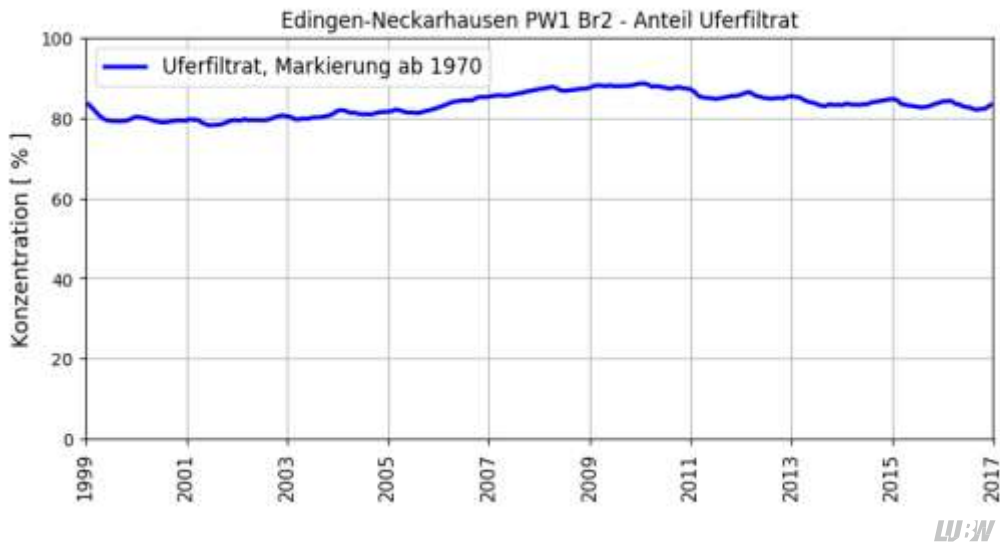


Abbildung 6.12: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 2 des PW1 von Edingen-Neckarhausen

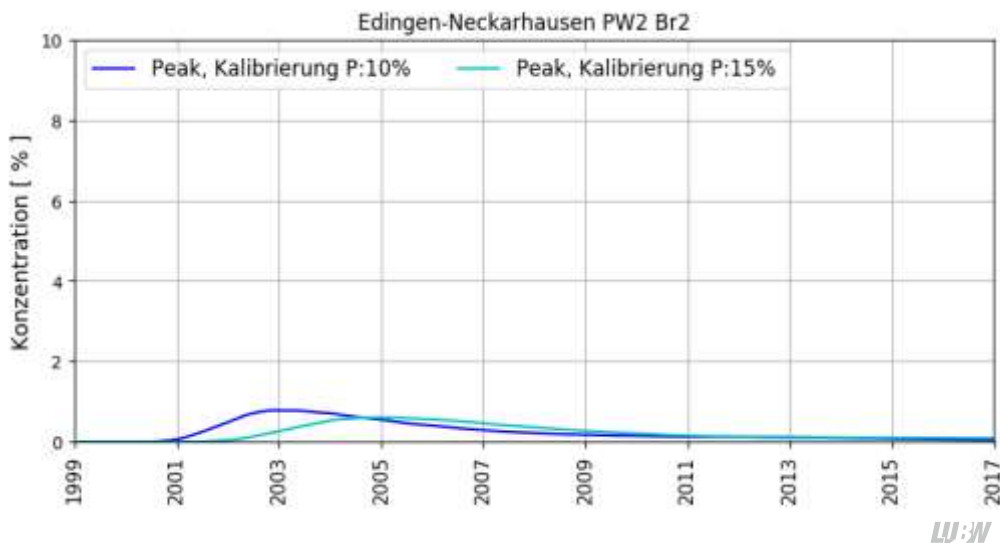


Abbildung 6.13: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 2 des PW2 von Edingen-Neckarhausen

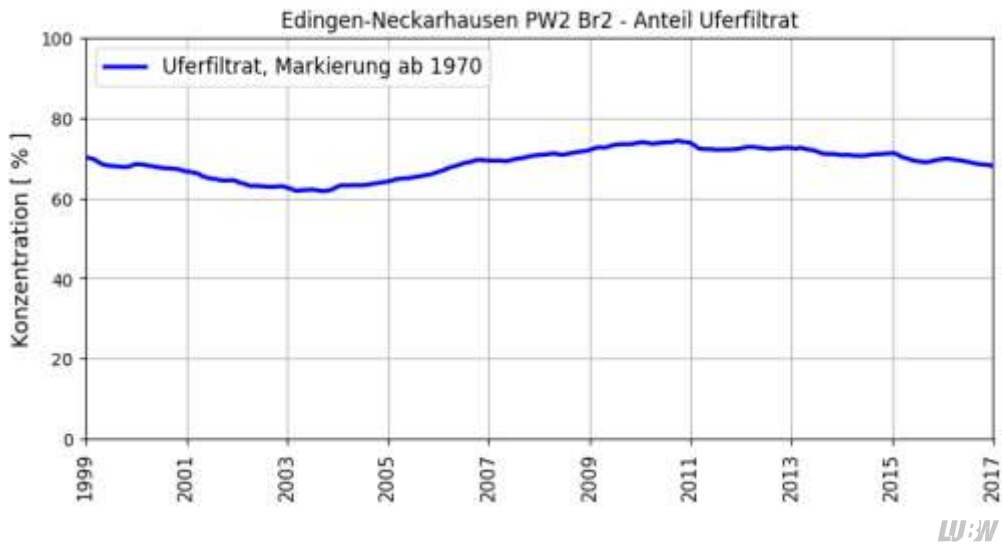


Abbildung 6.14: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 2 des PW2 von Edingen-Neckarhausen

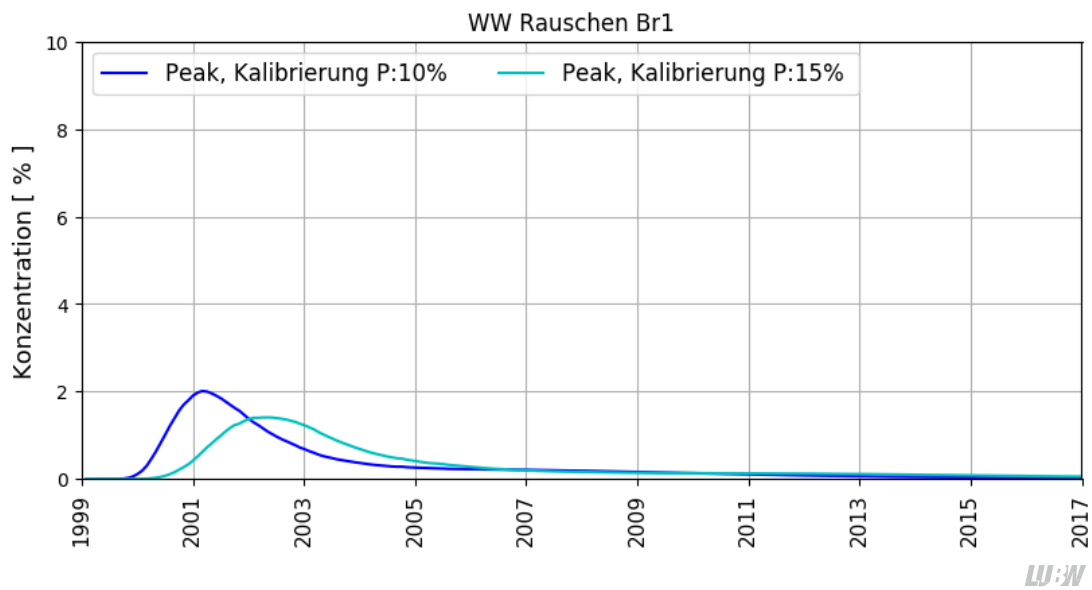


Abbildung 6.15: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen

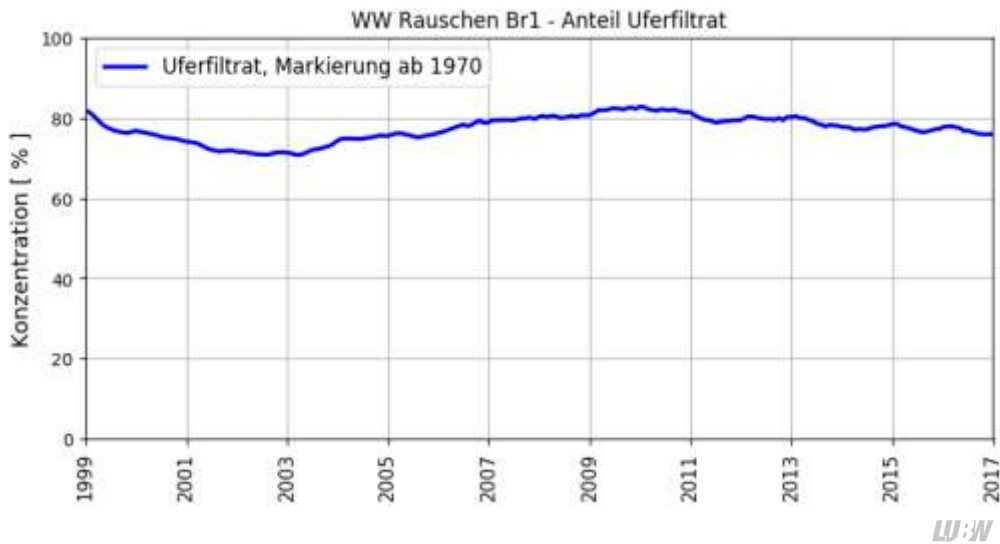


Abbildung 6.16: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen

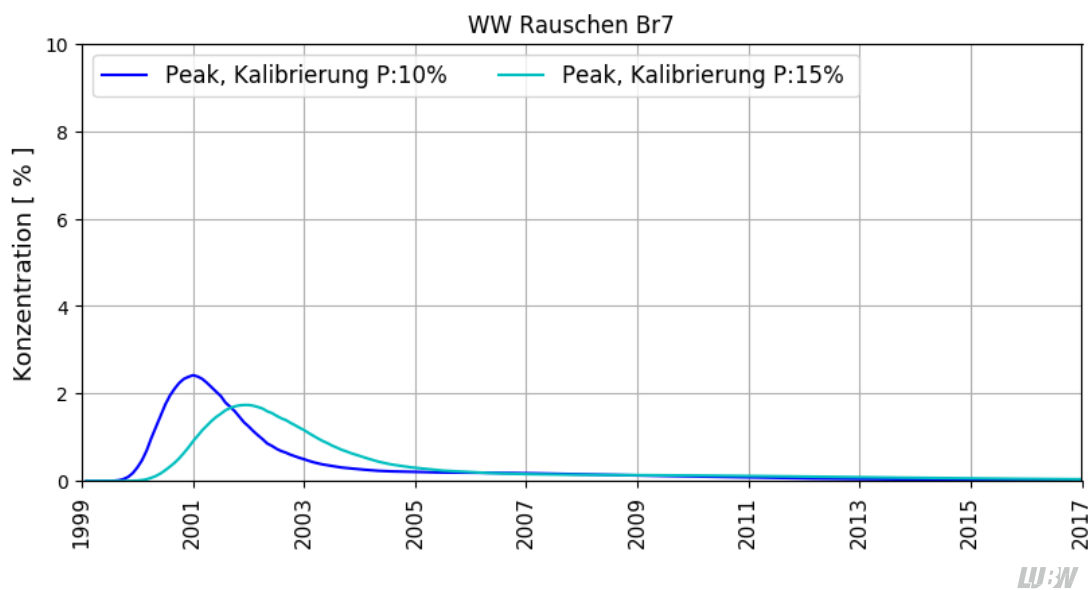


Abbildung 6.17: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen

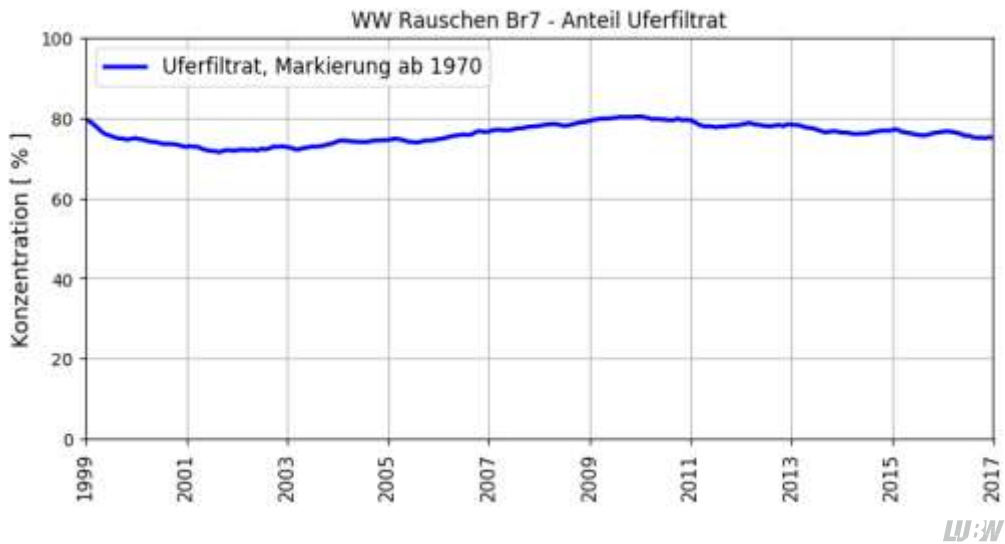


Abbildung 6.18: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen

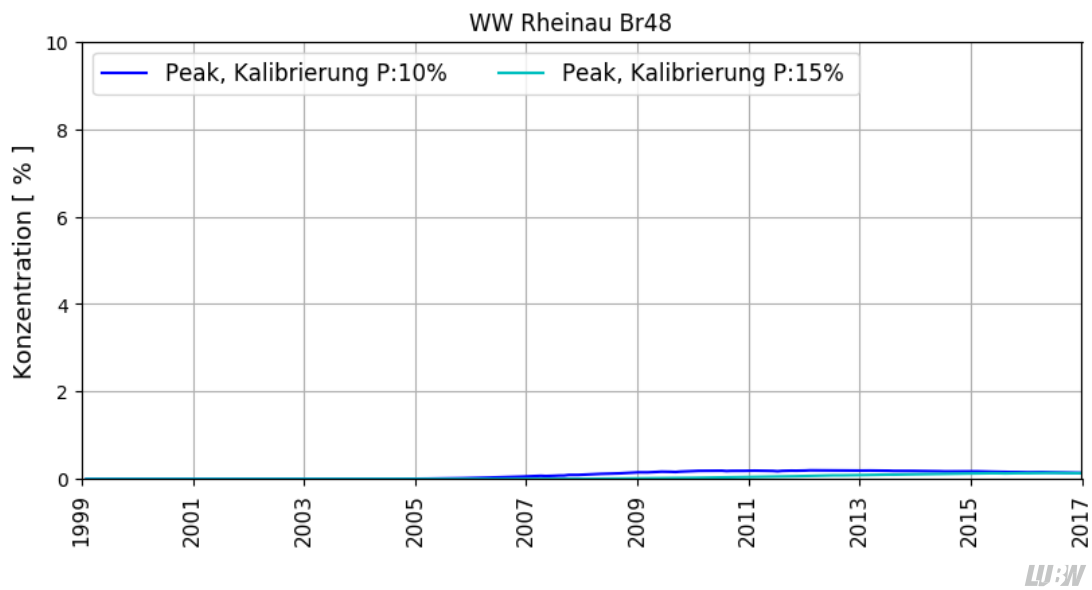


Abbildung 6.19: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau

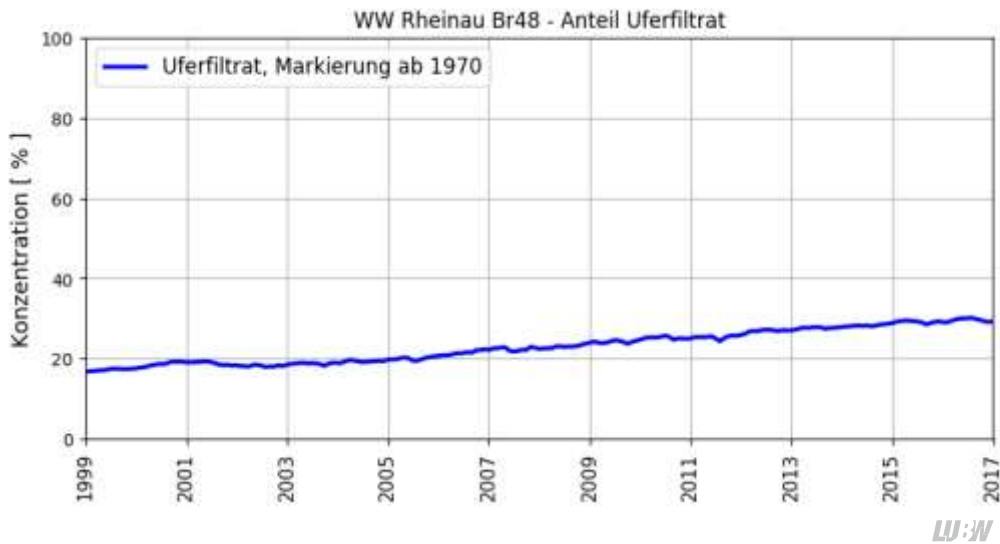


Abbildung 6.20: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau

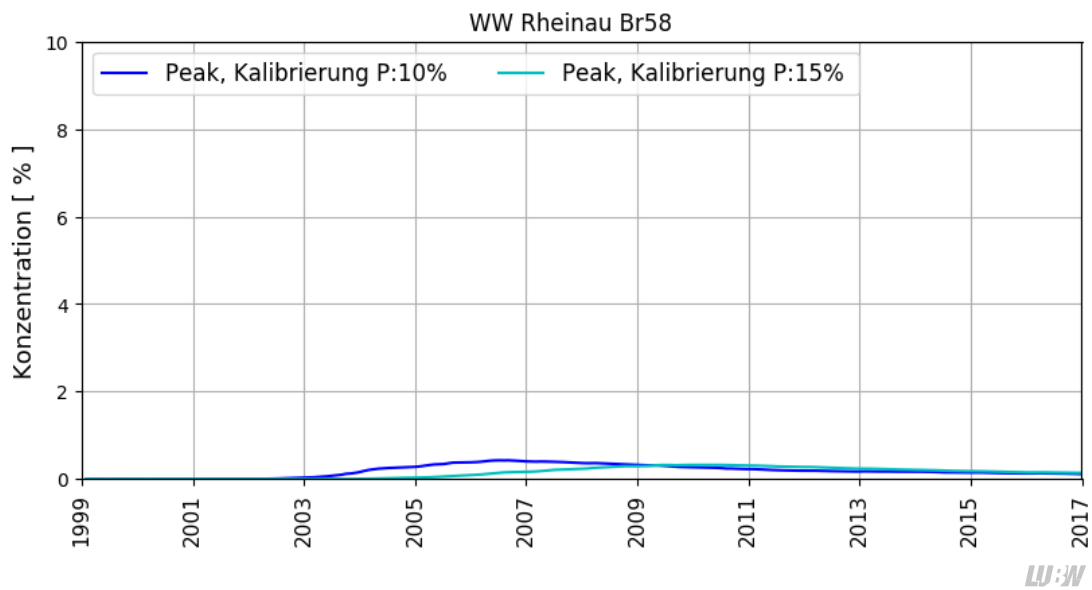


Abbildung 6.21: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau

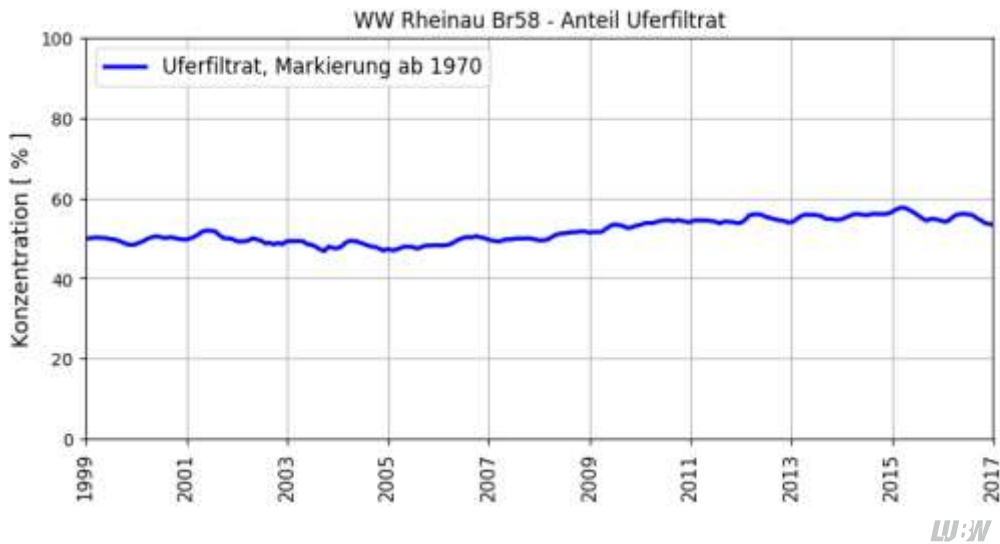


Abbildung 6.22: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau

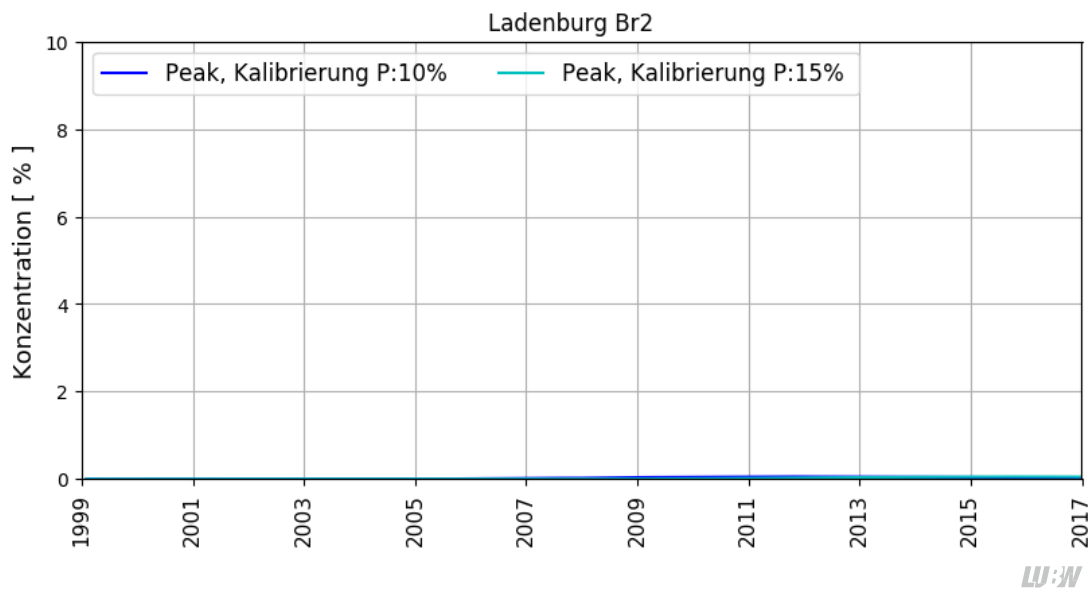


Abbildung 6.23: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckarufiltrats mit 100 % am Brunnen 2 von Ladenburg

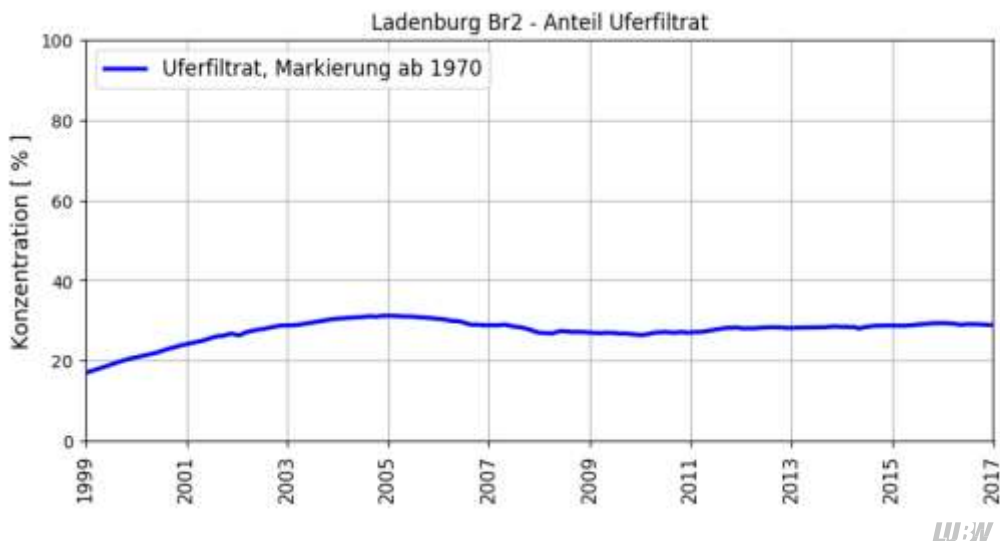


Abbildung 6.24: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckarufiltrats am Brunnen 2 von Ladenburg

In Tabelle 6.1 ist der Uferfiltratanteil und die aus der Stoßbelastung ermittelte Laufzeit zu den Wasserversorgungsanlagen zusammengestellt, die von der TFA-Problematik betroffen sind bzw. Uferfiltrat vom Neckar zu erwarten haben. Danach haben die neckarnahen Wasserversorgungsstandorte wie Edingen-Neckarhausen fast ausschließlich Neckarufiltrat und die Laufzeiten sind mit 1 bis 3 Jahren vergleichsweise gering. Das bedeutet, dass eine Reduzierung der TFA-Konzentration im Neckar sich hier sehr schnell auswirkt und es zu einer deutlichen Reduzierung kommt. Dies ist auch für die Brunnen des Wasserwerks Rauschen der Fall. Die Brunnenreihe des Wasserwerks Rheinau ist von Süd nach Nord ausgerichtet. Hier sind die Anteile an Neckarufiltrat an den nördlichen Brunnen deutlich größer als an den südlichen Brunnen. Aufgrund der Entfernung zum Neckar sind die Laufzeiten zu den südlichen Brunnen mit ca. 15 Jahren vergleichsweise lang und Änderungen an den TFA-Verhältnissen im Neckar werden sich hier erst nach ein bis zwei Jahrzehnten ergeben.

Tabelle 6.1: Berechneter Anteil an Uferfiltrat und Laufzeiten vom Neckar zu einzelnen Trinkwassergewinnungen

Wasserversorgung	Anteil Uferfiltrat in %	Laufzeit in Jahre
Edingen - Neckarhausen	90 – 95	1 – 2
Edingen – Neckarhausen PW 1	75 – 90	2 – 3
Edingen – Neckarhausen PW 2	60 – 80	4 – 6
WW Rauschen	70 – 90	2 – 4
WW Rheinau (Nord)	50 – 60	6 – 10
WW Rheinau (Süd)	20 – 40	~ 15
Ladenburg	20 - 30	~ 15

LUBW

7 TFA-Transport

7.1 TFA-EINTRAG ÜBER DEN NECKAR

TFA wird im numerischen Modell ausschließlich über den Neckar eingetragen. Eine Hintergrundbelastung zum Beispiel durch die Landwirtschaft ist nicht implementiert. Generell kann aber von einer allgemeinen Hintergrundbelastung von ca. 1 µg/l ausgegangen werden. Im numerischen Modell wird die Infiltrationsrate aus dem Neckar mit der TFA-Konzentration des Neckarwassers belegt. Die im Grundwassermodell ange-setzte monatliche TFA-Konzentration ist in Abbildung 3.1 bis Ende 2016 dargestellt. Für den darauf folgen-den Zeitraum wurden die gemessenen Werte des Neckars angesetzt. Die sich aus der TFA-Konzentration ergebende TFA-Fracht für die Neckarinfiltration in den Grundwasserleiter ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Infiltrationsraten beginnen bei 0,6 bis 0,7 kg/d im Jahr 2000 und steigern sich auf durchschnittlich 2 bis 3 kg/d am Ende des Simulationszeitraumes. Auf Grund der angenommenen Produktionsschwankungen und der hydrologischen Schwankungen erreichen die Infiltrationsraten maximale Werte von bis zu 16 kg TFA pro Tag, die im Spätsommer 2016 bei vergleichsweise trockenen Verhältnissen in den Grundwasserleiter gelangen.

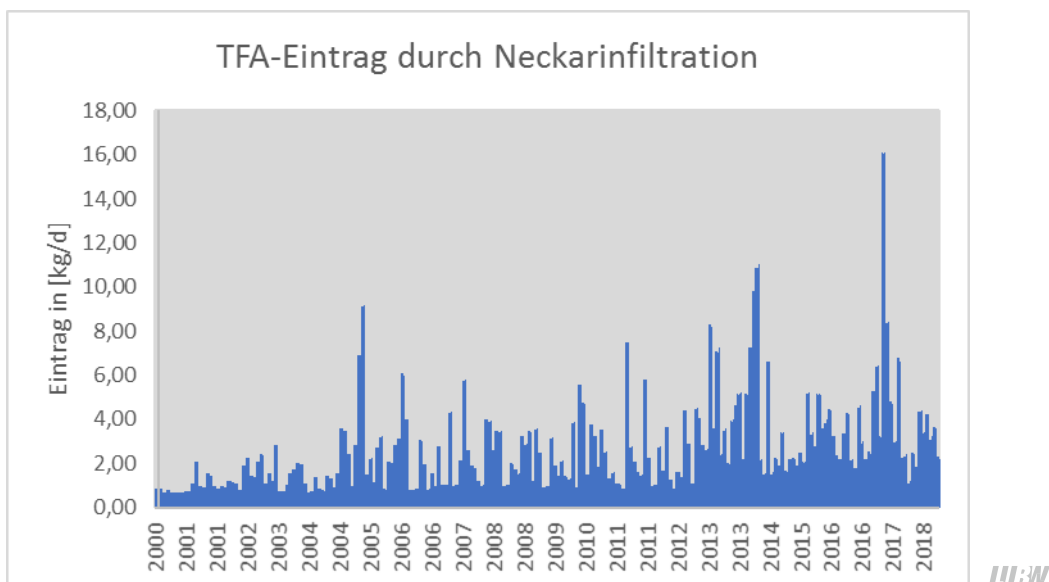


Abbildung 7.1: TFA-Eintrag in den Grundwasserleiter durch Neckarinfiltration

7.2 TFA-GANGLINEN

Mit Hilfe des numerischen Modells erfolgte die Simulation des TFA-Transports seit 1999 bis Ende 2017 auf Basis der instationären Strömung. Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse standen gemessene TFA-Konzentrationen erst seit Oktober 2016 zur Verfügung. Dies bedeutet, dass nur am Ende des Simulationszeitraumes Messwerte vorhanden sind, um das Modell zu überprüfen. Meist sind 3 bis 5 Messwerte in einem Zeitraum von etwas mehr als einem Jahr vorhanden und diese Messwerte streuen teilweise um mehrere µg/l bis maximal 10 µg/l. Dadurch ist nur eine näherungsweise Abbildung der gemessenen Verhältnisse möglich. In Abbildung 7.2 bis Abbildung 7.17 sind die berechneten TFA-Ganglinien und die gemessenen Werte an ausgewählten Brunnen und Messstellen sowie der gesundheitliche Orientierungswert (GOW), der Maßnahmenwert (MNW) und der Höchstwert für Vorsorgemaßnahmen (HMNW) dargestellt. Es sind jeweils drei

Simulationsergebnisse gezeigt, die sich durch die abgeleitete TFA-Konzentration des Neckaruferfiltrats unterscheiden. Die Basis bildet die vom Regierungspräsidium Stuttgart abgeschätzte hohe TFA-Fracht im Abwasser, welches bei Bad Wimpfen in den Neckar eingeleitet wird. Da es sich im Laufe der Bearbeitung gezeigt hat, dass mit dieser Frachtabschätzung die Messwerte vom Modell unterschätzt werden, wurden zwei weitere Varianten mit einer um 5 bzw. 10 µg/l erhöhten TFA-Konzentration betrachtet. Meist liegen die Messwerte innerhalb der dadurch entstandenen Bandbreite. Die beste Modellanpassung ergibt sich in den meisten Fällen für den Modelllauf, bei dem die TFA-Konzentration im Neckar um 5 µg/l erhöht wurde.

Da sich die Porosität anhand der vorliegenden Daten nicht exakt bestimmen sondern nur eingrenzen lässt, wurden zwei Modellläufe mit 10 und 15 % Porosität durchgeführt.

An den Brunnen von Edingen-Neckarhausen und des Wasserwerks Rauschen, werden die höchsten TFA-Konzentrationen beobachtet und auch simuliert. Hier werden TFA-Konzentrationen über 20 µg/l erreicht. An den Brunnen des Wasserwerks Rheinau sind entsprechend den Ergebnissen zur Simulation des Neckaruferfiltrats ansteigende TFA-Konzentrationen von Süden nach Norden zu beobachten. Während die südlichen Brunnen TFA-Konzentrationen unterhalb des GOW von 3 µg/l zeigen, steigen die TFA-Konzentrationen nach Norden bis knapp unter 10 µg/l an.

Vom Grundwassermodell werden die gemessenen Schwankungsamplituden näherungsweise simuliert. Eine exakte Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Ganglinie ist nicht möglich, da sich aus den wenigen Messwerten keine systematischen Schwankungen z.B. auf Grund der hydrologischen Verhältnisse ableiten lassen. Die Abbildung der Schwankungsbreite wird als ausreichend erachtet, zumal auch die Eintragsfunktion bis Ende 2016 nur eine Schätzung ist und nicht auf Messwerten basiert.

Generell führt ein höherer Hohlraumanteil zu geringeren simulierten TFA-Konzentrationen. Vergleicht man die Simulationsergebnisse der beiden Hohlraumanteile, so zeigt sich, dass in den meisten Fällen die beste Übereinstimmung bei einem Hohlraumanteil von 10 % vorliegt, wenn die abgeschätzte Eintragskonzentration im Neckar um 5 µg/l erhöht wird. Wird die Eintragsfunktion um 10 µg/l erhöht, dann sind die besten Ergebnisse bei 20 % zu finden, da bei einem größeren Hohlraumanteil mehr Masse eingetragen werden muss, um dieselben Konzentrationen im Grundwasser zu erhalten.

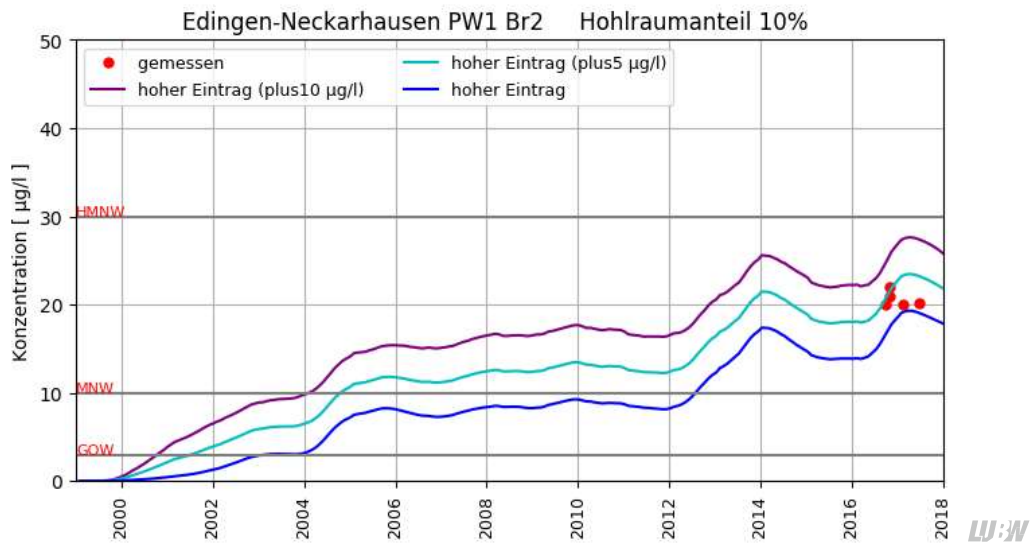


Abbildung 7.2: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

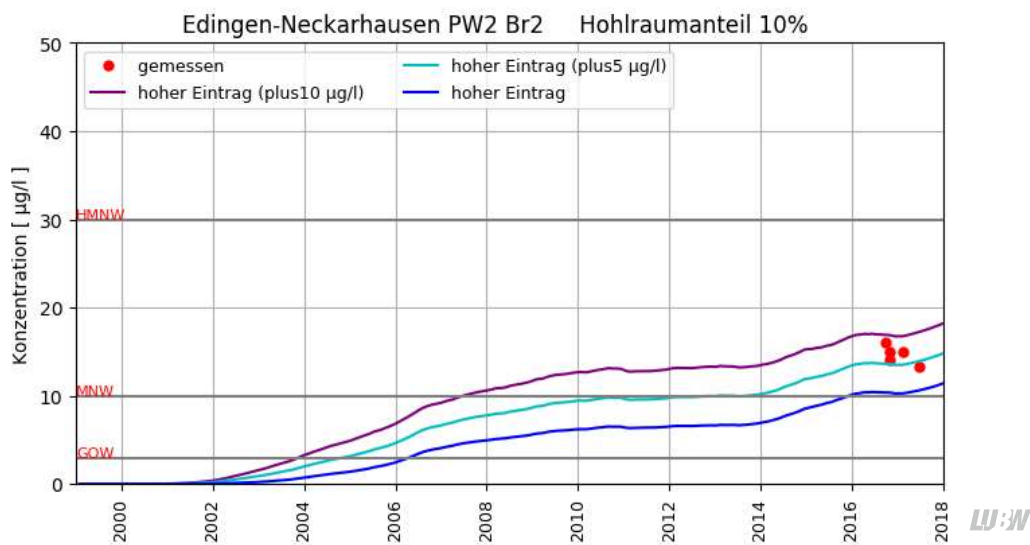


Abbildung 7.3: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

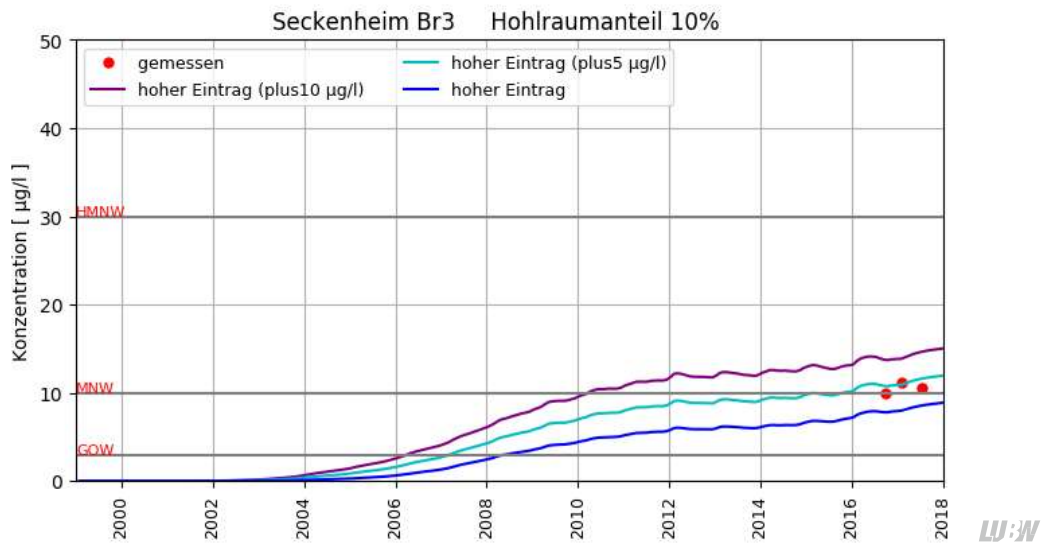


Abbildung 7.4: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

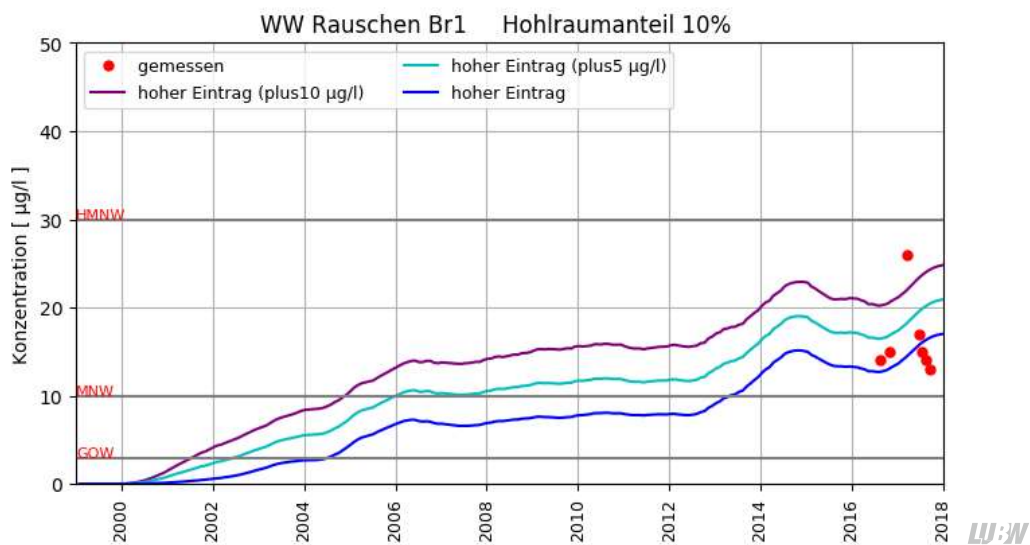


Abbildung 7.5: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

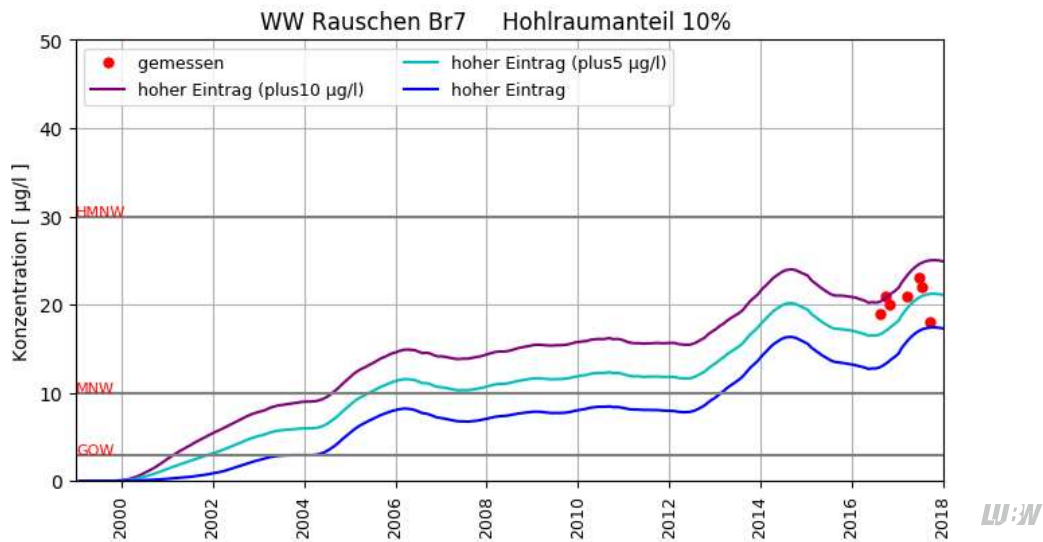


Abbildung 7.6: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

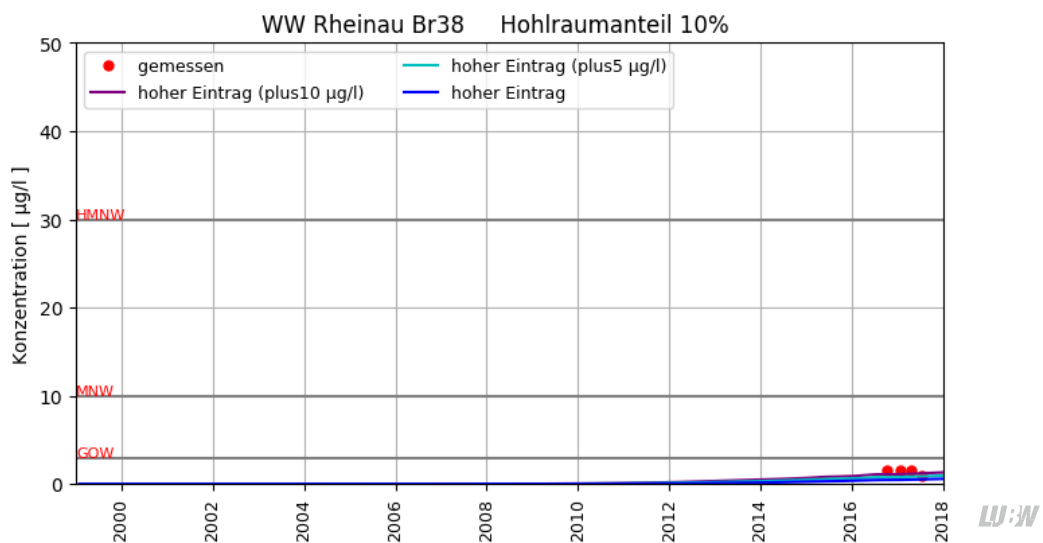


Abbildung 7.7: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

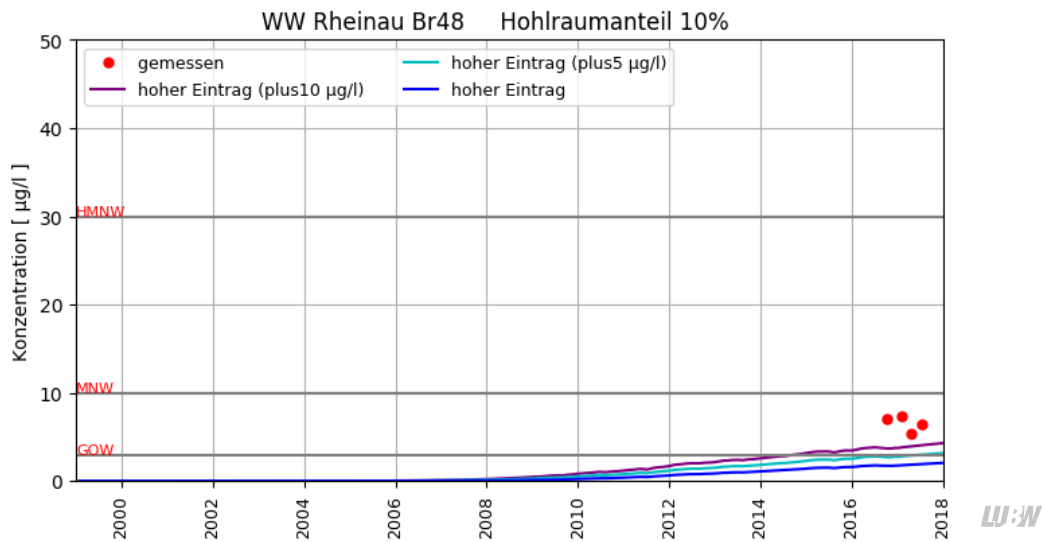


Abbildung 7.8: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

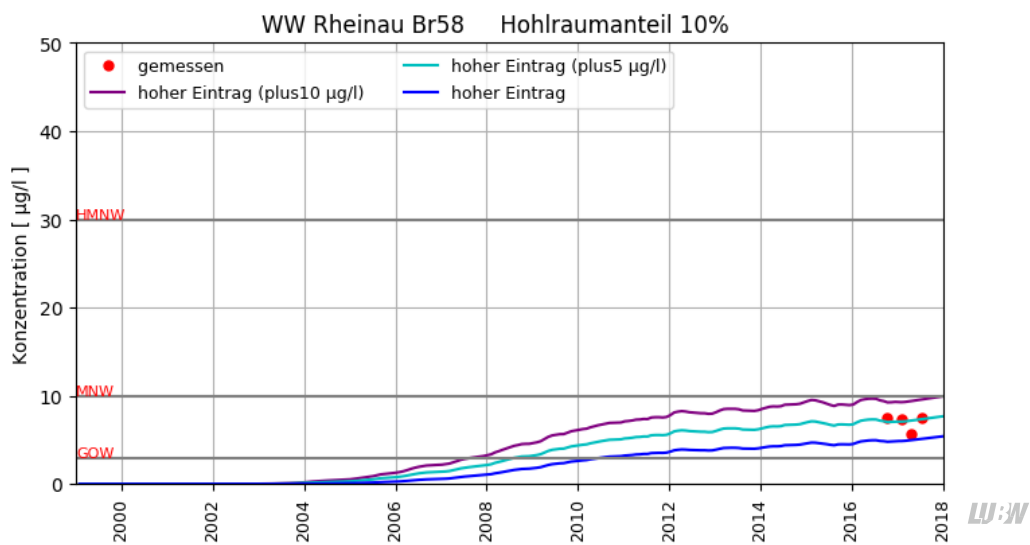


Abbildung 7.9: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

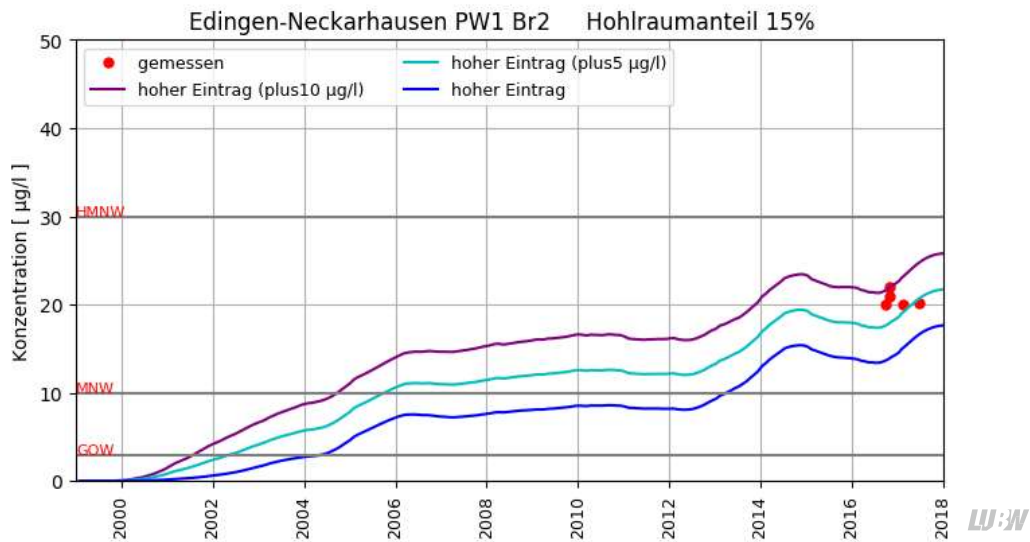


Abbildung 7.10: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

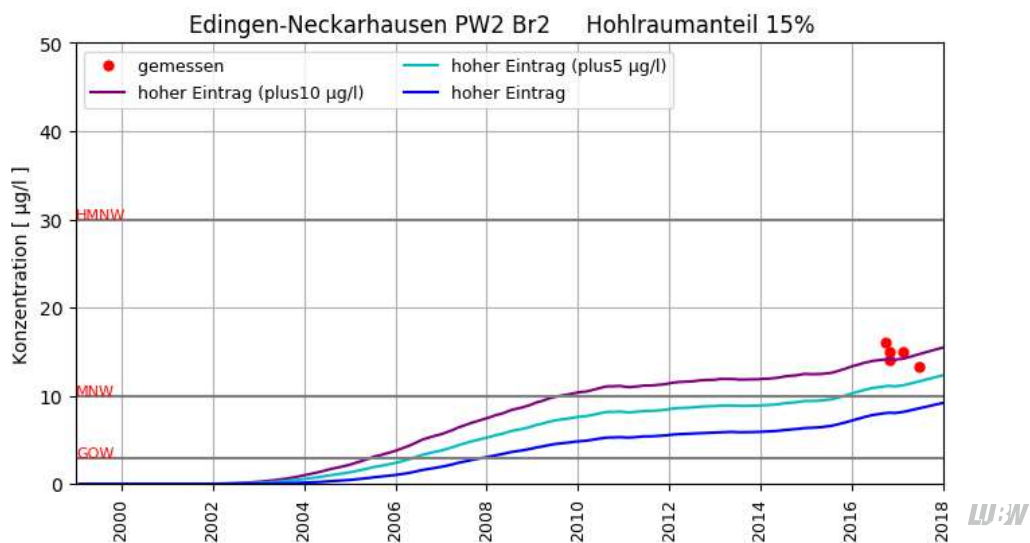


Abbildung 7.11: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

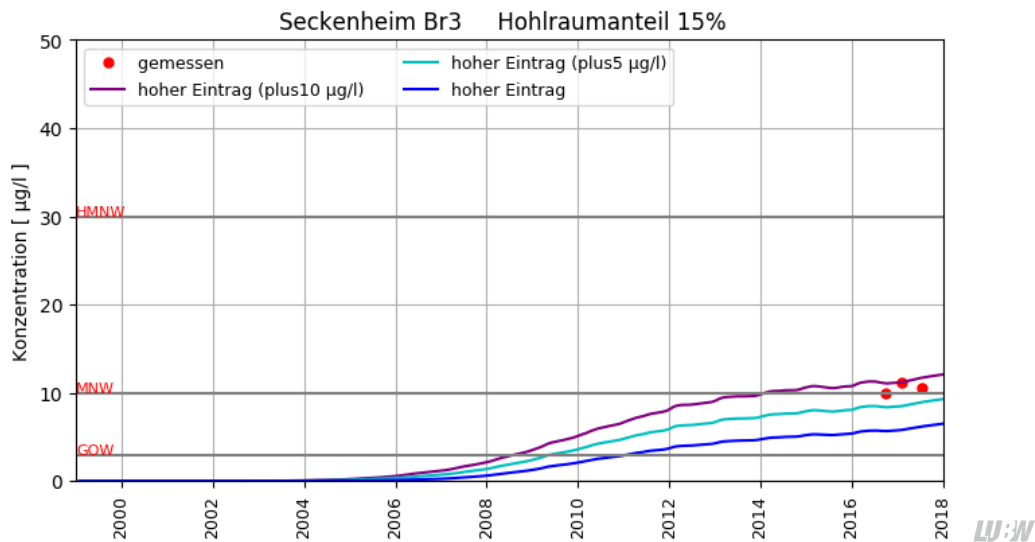


Abbildung 7.12: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

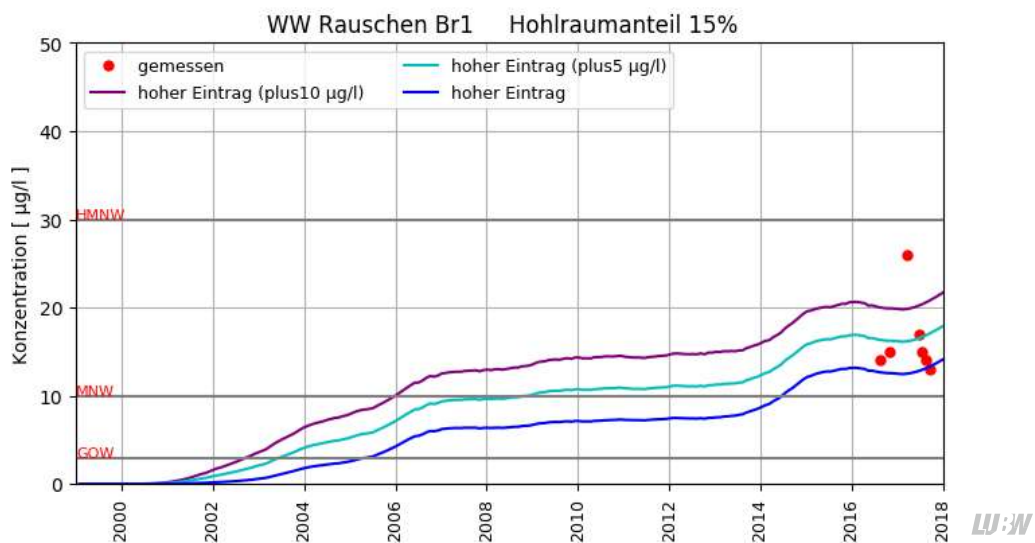


Abbildung 7.13: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

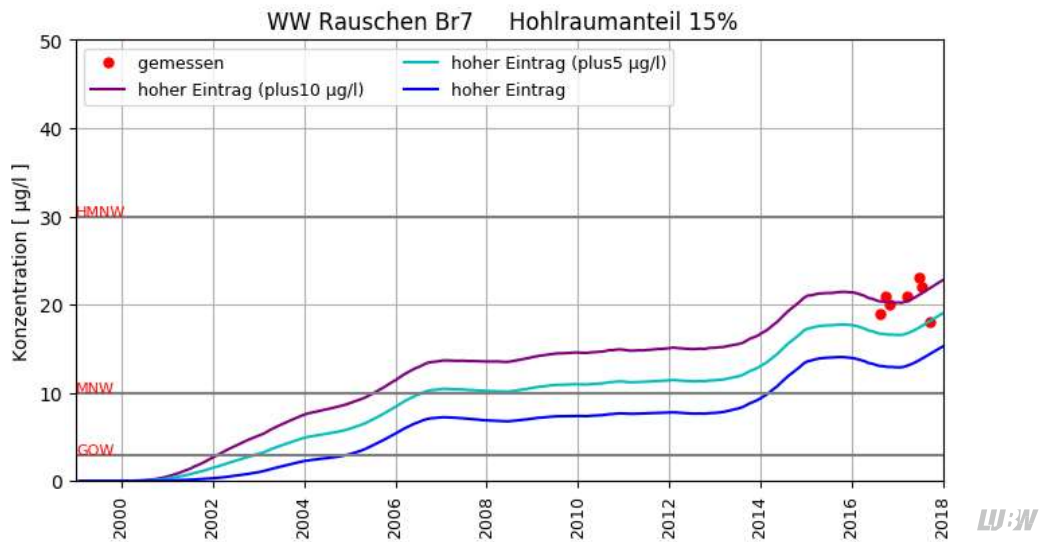


Abbildung 7.14: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

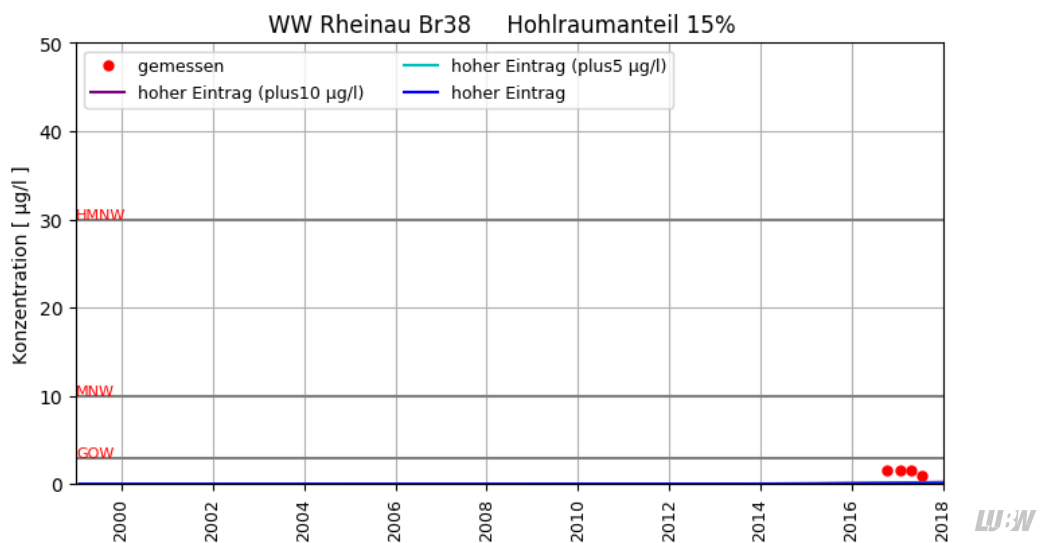


Abbildung 7.15: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

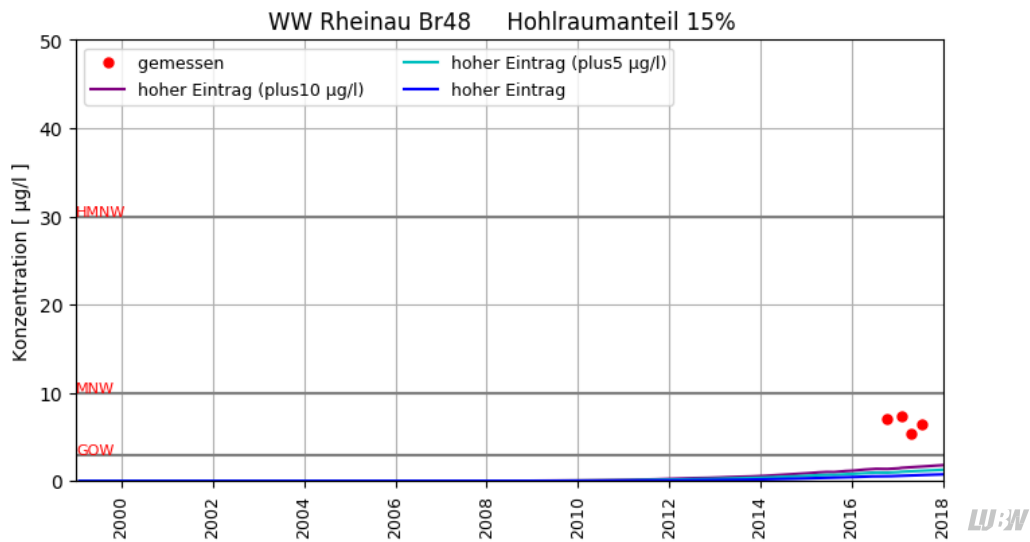


Abbildung 7.16: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

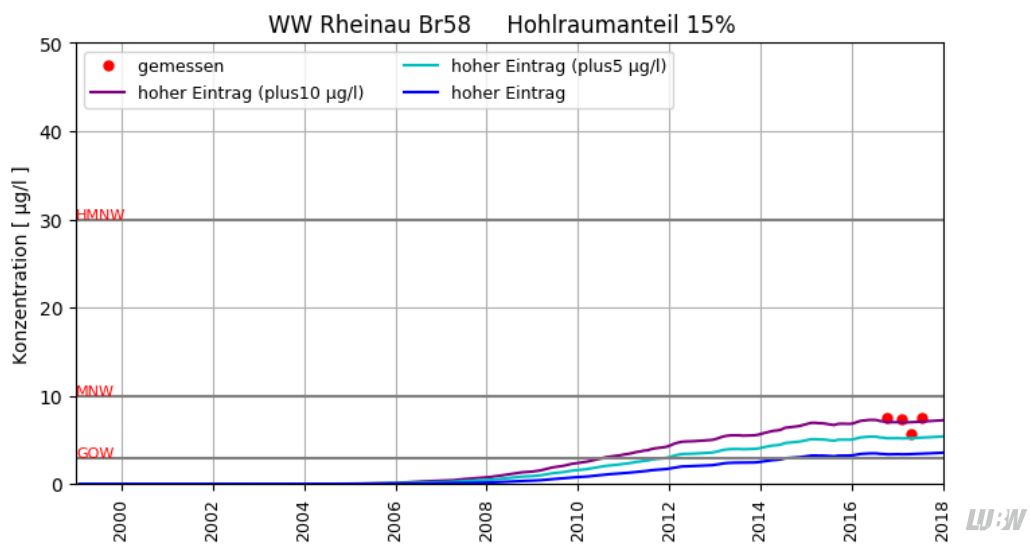


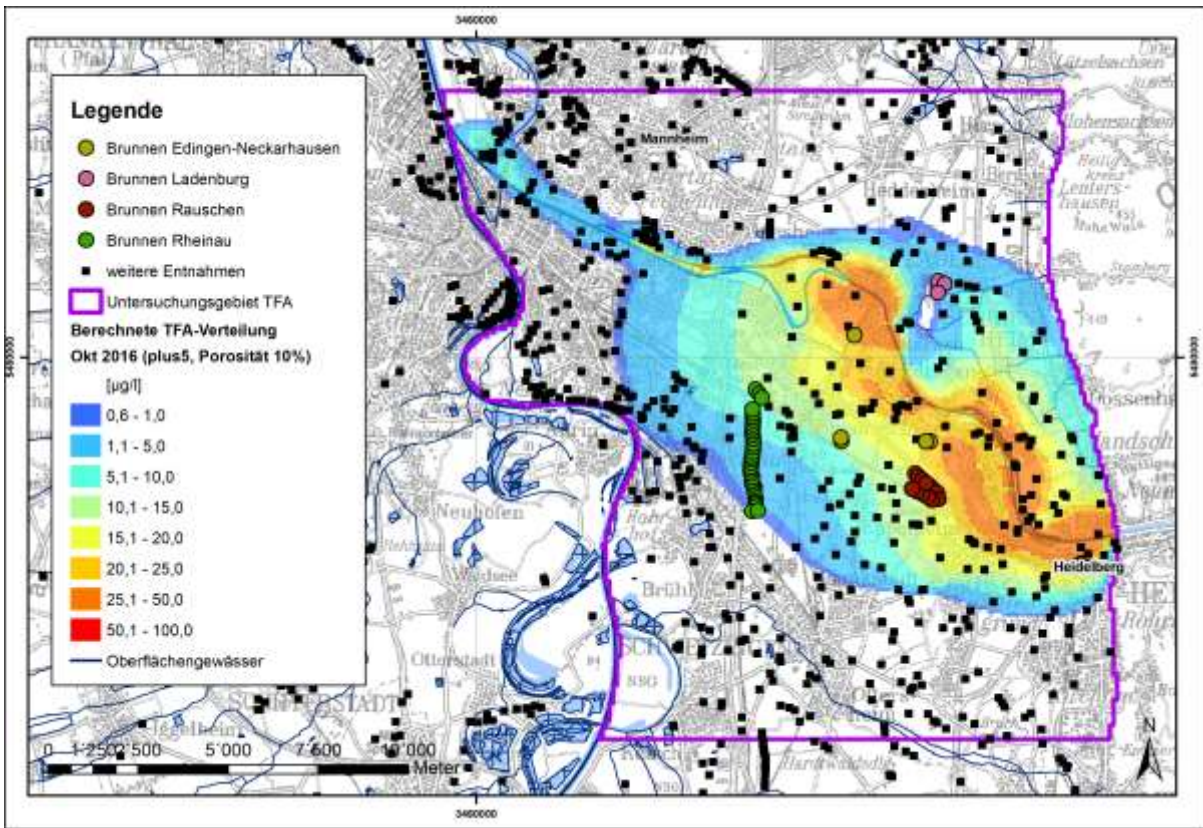
Abbildung 7.17: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

7.3 TFA-VERTEILUNGEN

Neben den TFA-Ganglinien an ausgewählten Trinkwasserbrunnen im Rhein-Neckar-Raum wurde die mit Hilfe des Grundwassermodells berechnete TFA-Verteilung im OGWL ausgewertet. In Abbildung 7.18 bis Abbildung 7.21 sind die berechneten TFA-Verteilungen für Oktober 2016 und Dezember 2017 für 10 und 15 % Porosität dargestellt. Dabei wurde der Eintrag gemäß der maximalen Abschätzung plus 5 µg/l angesetzt.

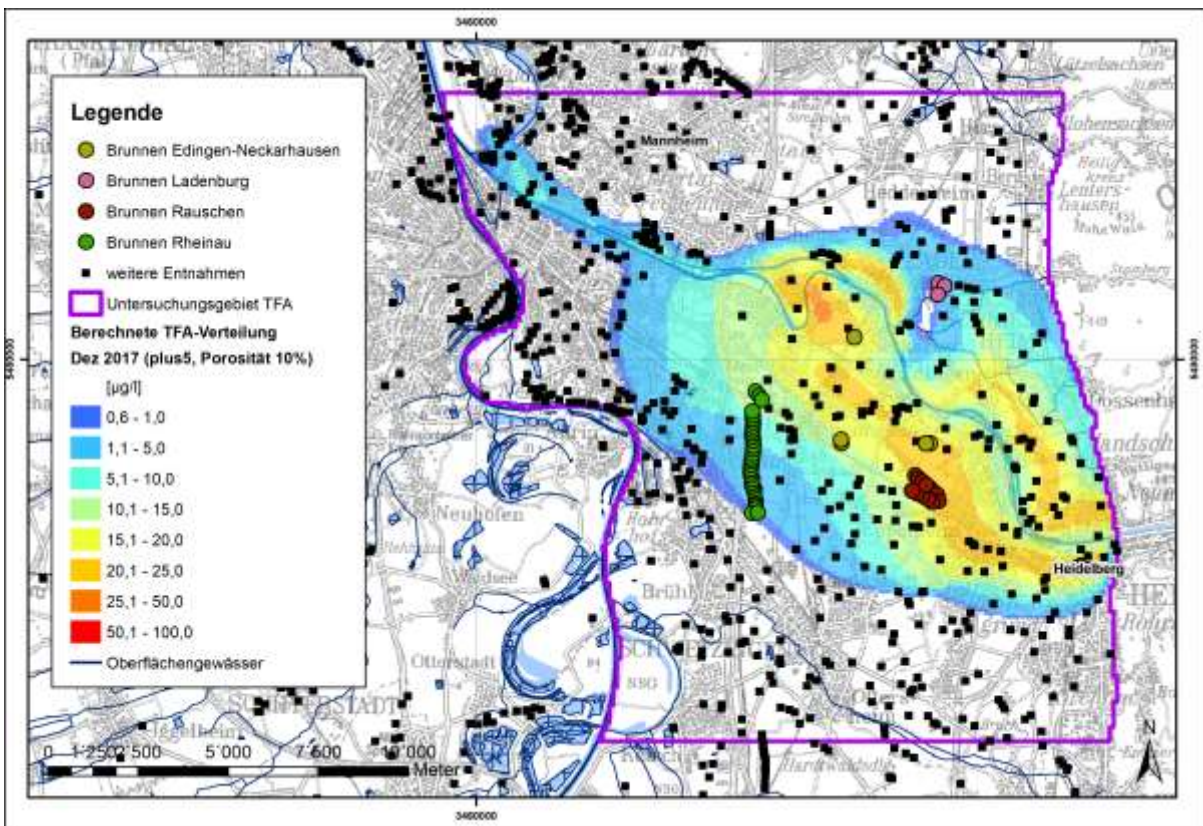
Die Verteilungen zeigen im Oktober 2016 die höchsten TFA-Konzentrationen in Neckarnähe oberstrom des Wehres Feudenheim. Hier werden maximale TFA-Konzentrationen von 20 bis 25 µg/l erreicht. Die maximale Ausdehnung der TFA-Fahne mit Konzentrationen von 1 µg/l erreichen die südlichsten Brunnen von Rheinau. Nördlich vom Neckar ist die TFA-Fahne weniger weit ausgebreitet. Hier endet die Fahne südlich von Heddesheim. Vergleicht man die mit 10 % Porosität berechnete TFA-Verteilung mit jener mit 15 % Porosität, so lässt sich im Wesentlichen eine geringere Ausbreitung aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten bei 15 % erkennen. In diesem Fall reichen die TFA-Konzentrationen größer als 1 µg/l nicht bis zu den südlichsten Brunnen in Rheinau. Da hier aber bereits nennenswerte TFA-Konzentrationen über 1 µg/l beobachtet werden, werden die TFA-Konzentrationen bei einer Porosität größer als 10 % im Modell am Südrand der TFA-Fahne unterschätzt. Dies lässt sich auch nicht mit einem erhöhten Eintrag kompensieren, da das Erreichen der TFA-Fahne an den südlichen Brunnen ausschließlich von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, die neben dem Gefälle und der Durchlässigkeitsstruktur maßgeblich von der Porosität bestimmt wird.

Vergleicht man die TFA-Verteilung vom Oktober 2016 mit der vom Dezember 2017, so lässt sich die Reduktion der TFA-Fracht im Neckar ausschließlich in Neckarnähe beobachten. Während im Oktober 2016 hier noch die höchsten TFA-Werte zu finden waren, sind im Dezember 2017 hier die TFA-Konzentrationen deutlich unter 10 µg/l gefallen.



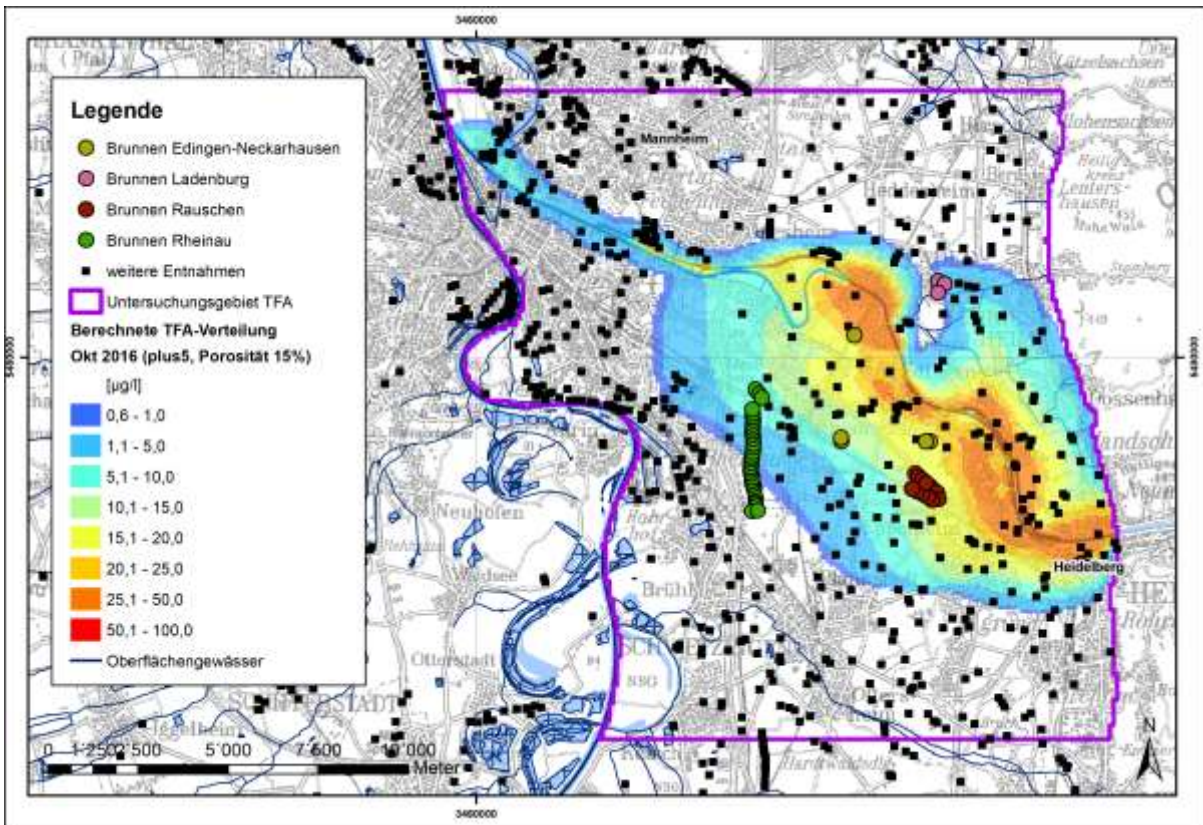
LU:W

Abbildung 7.18: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 10 %



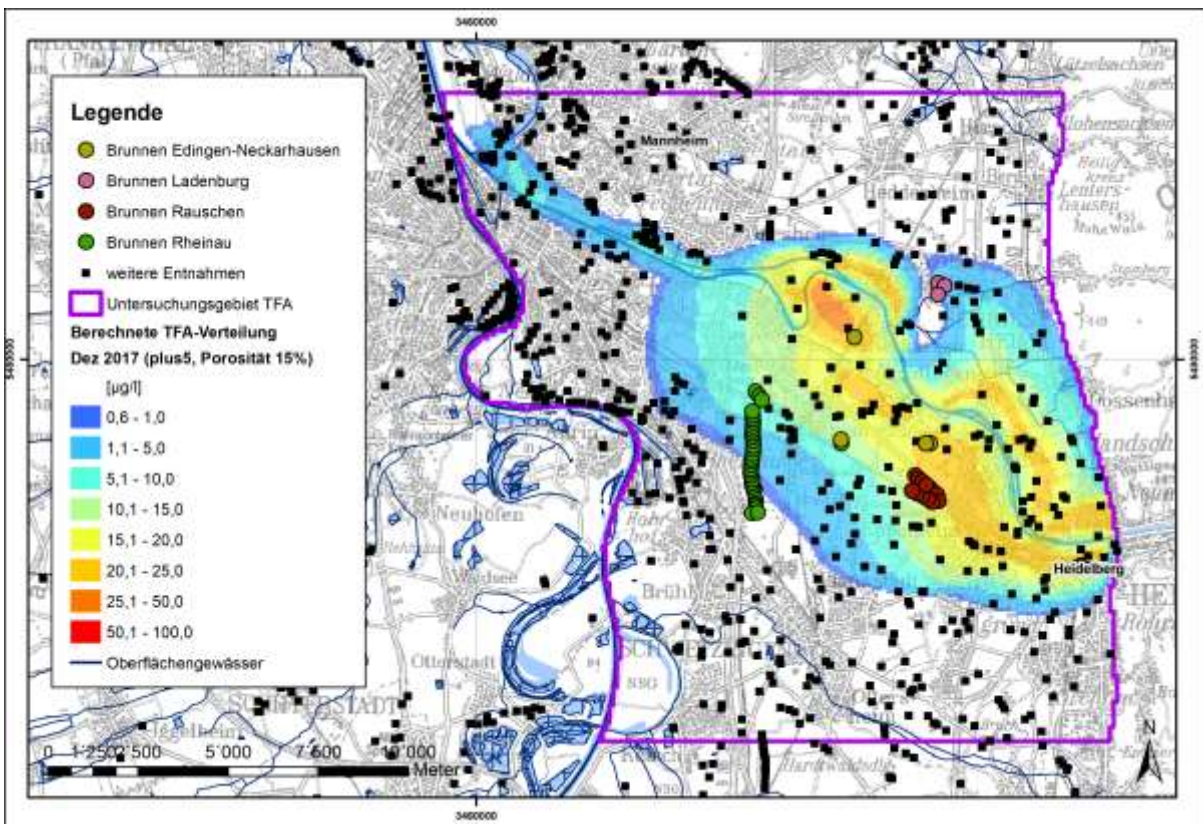
LU:W

Abbildung 7.19: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 10 %



LUBW

Abbildung 7.20: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 15 %



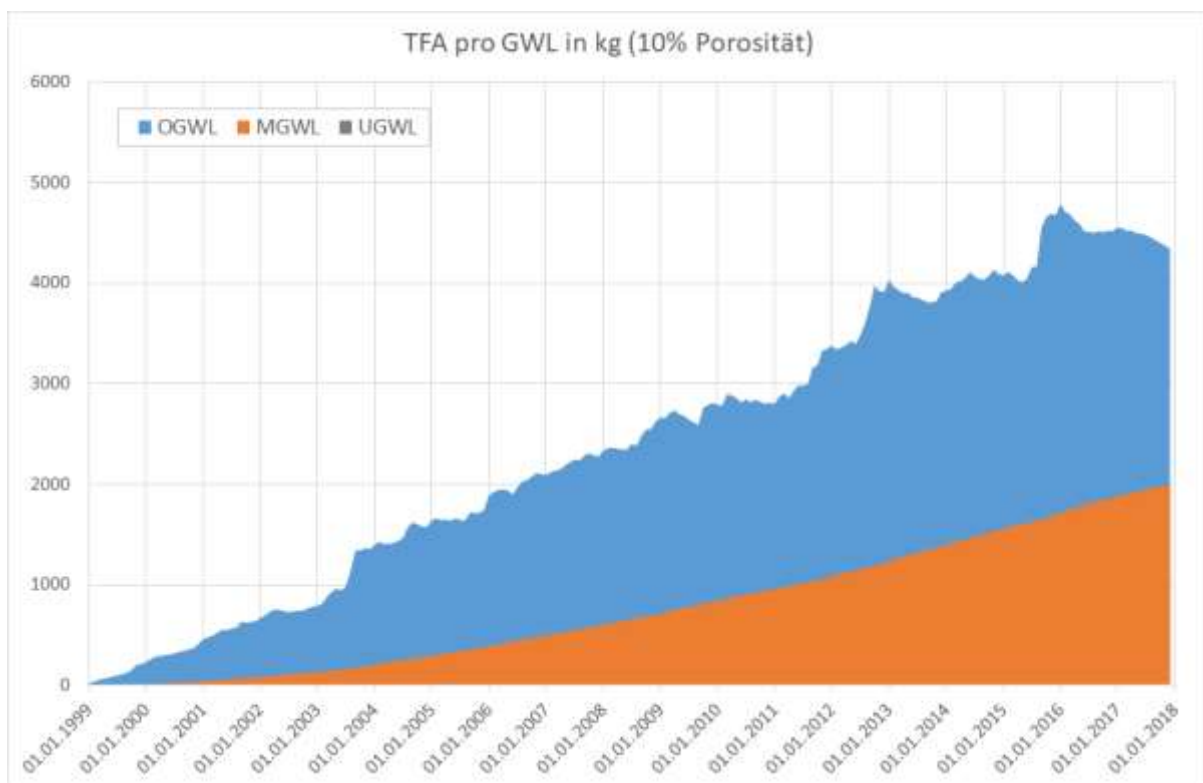
LUBW

Abbildung 7.21: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 15 %

7.4 TFA-BILANZEN

Mit Hilfe des Grundwassermodells wurden die Massenbilanzen für TFA in der historischen Betrachtung ausgewertet. Die zeitliche Entwicklung der Gesamtmasse im Grundwasserleiter differenziert nach den drei hydrogeologischen Haupteinheiten ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Danach nimmt die Gesamtmasse an TFA seit 1999 stetig zu. Da der Eintrag über den Neckar erfolgt, findet sich die Hauptmasse im OGWL. Die rechnerisch in den MGWL eingetragene TFA-Masse beträgt ca. ein Drittel der Masse im OGWL. Die produktionsbedingten und durch die Variabilität der Hydrologie bedingten Schwankungen des TFA-Eintrags über den Neckar lassen sich auch an der Entwicklung der Gesamtmasse im OGWL erkennen. Da seit Herbst 2016 produktionsbedingt der TFA-Eintrag in den Neckar zurück geht, zeigt sich hier auch ein Rückgang der Gesamtmasse im OGWL. Im MGWL ist kein Rückgang im Jahr 2017 zu erkennen. Im UGWL liegt nach den Modellbetrachtungen keine TFA-Masse vor.

Wertet man die Änderung der Massen im Grundwasserleiter innerhalb eines Jahres aus, so ergeben sich die in Tabelle 7.1 zusammengestellten Änderungen. Während im Jahr 2015 sich die Gesamtmasse im Aquifer um 773 kg erhöht hat, ist die Massenzunahme im Jahr 2016 mit 16 kg deutlich zurückgegangen. Da ab Herbst 2016 deutlich weniger TFA-Masse in den Neckar eingeleitet wurde, hat sich die Masse im Aquifer im Jahr 2017 um 45 kg verringert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Masse im Aquifer auf Grund der deutlich verringerten TFA-Einträge in Zukunft weiter verringern wird. Die Massenminderung im Jahr 2017 liegt in der Größenordnung von 1 % der rechnerisch ermittelten Gesamtmasse im Aquifer.



LU:W

Abbildung 7.22: Entwicklung der Gesamtmasse an TFA in den Hauptgrundwasserleitern (Porosität von 10 %)

Tabelle 7.1: Massenänderungen pro Jahr im Grundwasserleiter

Jahr	Massenänderung [kg]
In 2015	733
In 2016	16
In 2017	-45

LUBW

Neben der Entwicklung der TFA-Gesamtmasse im Aquifer wurde für ausgewählte Monate eine geschlossene Massenbilanz erstellt. Für Oktober 2015, Oktober 2016 und Dezember 2017 sind diese Massenbilanzen in Tabelle 7.2 bis Tabelle 7.4 zusammengestellt. Im Oktober 2015 hat noch ein vergleichsweise hoher Eintrag von TFA stattgefunden. Die dadurch aus dem Neckar eingetragene Nettorate an TFA betrug 5,3 kg/d. Diese Masse wird hauptsächlich im Grundwasserleiter gespeichert., so dass es im Oktober 2015 zu einer deutlichen Massenzunahme von TFA im Aquifer kommt. Dies gilt auch für den vorangegangenen September, so dass die Gesamtmasse im Aquifer gemäß Abbildung 7.22 in diesem Zeitraum deutlich ansteigt. Von den Grundwasserentnahmen und dem Gewässernetz wird ein Teil des TFA ausgetragen. Der hauptsächliche Austrag findet durch den Austritt von Grundwasser in den Neckar unterstromig der beiden Wehre statt.

Tabelle 7.2: TFA-Massenbilanz für Oktober 2015

Bilanzgröße	Zufluss in kg/d	Abfluss in kg/d
Neckar	8,4	3,1
Modellränder	0	0
Grundwasserneubildung	0	0
Gewässernetz	0	0,4
Entnahmen	0	0,6
Gesamt:	8,4	4,1
Zunahme der Masse im Aquifer: 4,3 g/d		

LUBW

Vergleicht man die Massenbilanz von Oktober 2015 mit der für Oktober 2016 bzw. Dezember 2017 so wird die Reduktion des TFA-Eintrags infolge abnehmender TFA-Konzentrationen im Neckar ab Oktober 2016 deutlich. Während im Oktober 2016 die Massenänderung im Aquifer näherungsweise ausgeglichen ist, kommt es im Dezember 2017 zu einer deutlichen Reduzierung der Masse im Aquifer, was auf einen lokalen neckarnahen Konzentrationsrückgang hinweist, der sich auch aus Abbildung 7.21 erkennen lässt.

Tabelle 7.3: TFA-Massenbilanz für Oktober 2016

Bilanzgröße	Zufluss in kg/d	Abfluss in kg/d
Neckar	3,1	2,4
Modellränder	0	0
Grundwasserneubildung	0	0
Gewässernetz	0	0,1
Entnahmen	0	0,5
Gesamt	3,1	3,0
Zunahme der Masse im Aquifer: 0,1 g/d		

LUBW

Der Austragsanteil an TFA-Masse durch die Grundwasserentnahmen ist in allen drei ausgewerteten Monaten ähnlich. Größere Unterschiede zwischen den Monaten zeigen sich im Austrag über das Gewässernetz infolge der hydrologischen Schwankungen.

Tabelle 7.4: TFA-Massenbilanz für Dezember 2017

Bilanzgröße	Zufluss in kg/d	Abfluss in kg/d
Neckar	1,0	1,0
Modellränder	0	0
Grundwasserneubildung	0	0
Gewässernetz	0	0,2
Entnahmen	0	0,6
Gesamt	1,0	1,8
Abnahme der Masse im Aquifer: 0,8 g/d		

LUBW

8 Sensitivitätsanalyse der Transportparameter

8.1 DURCHFLUSSWIRKSAMER HOHLRAUMANTEIL

Die Sensitivität des durchflusswirksamen Hohlraumanteils wurde einerseits bei der Nachbildung der Chloridverhältnisse in Kap. 6 und andererseits bei der Berechnung der historischen TFA-Verhältnisse in Kap. 7 untersucht. Nach der Chloridbetrachtung lässt sich eine Bandbreite von 10 bis 20 % bei der Porosität ableiten. Nach der TFA-Transportberechnung ist eher von einer geringen Porosität in der Größenordnung von 10% auszugehen.

8.2 DISPERSIVITÄTEN

Für die Dispersivitäten lässt sich aus Literaturwerten eine Größenordnung von bis ca. 100 m Längsdispersivität ableiten. Auf Grund der Diskretisierung des Grundwassermodells im 100 m Raster ist auch von einer numerischen Dispersion auszugehen, die bei kleinen Dispersivitäten den dispersiven Transport dominieren. Um dies zu untersuchen, wurden Modellläufe mit 1 m, 50 m und 100 m Längsdispersivität durchgeführt. Die Modellergebnisse wurden exemplarisch an den in Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.12 dargestellten Brunnen ausgewertet. Danach sind die Unterschiede neckarnah am größten, wobei die Unterschiede zwischen 1 und 50 m Längsdispersivität eher gering sind auf Grund der numerischen Dispersion. An den neckarfernen Standorten insbesondere an den Brunnen des Wasserwerks Rheinau sind die Unterschiede gering. Da die TFA-Front bereits das Wasserwerk Rheinau erreicht hat, werden bei kleiner Dispersivität die höheren TFA-Konzentrationen berechnet als bei größerer Dispersivität. Die in der Modellberechnung gewählte Dispersivität von 50 m bildet die gemessenen Verhältnisse in den meisten Fällen adäquat ab.

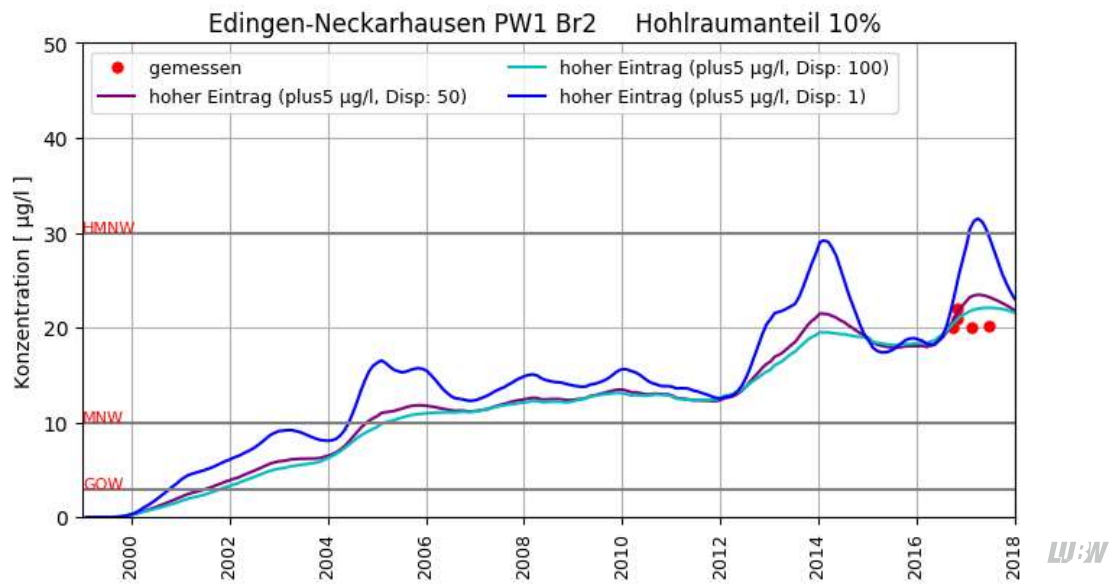


Abbildung 8.1: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

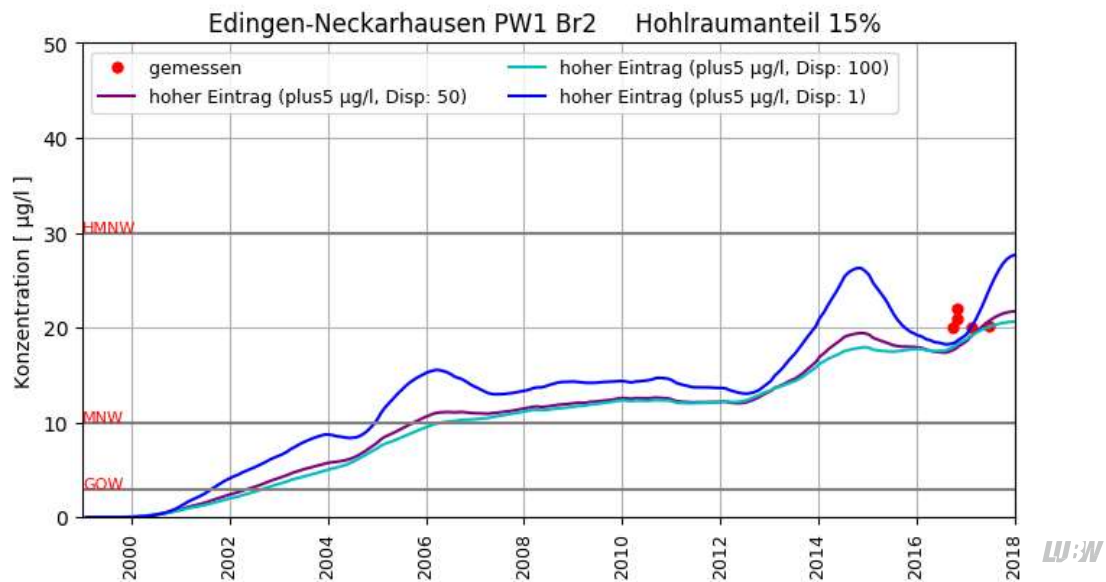


Abbildung 8.2: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

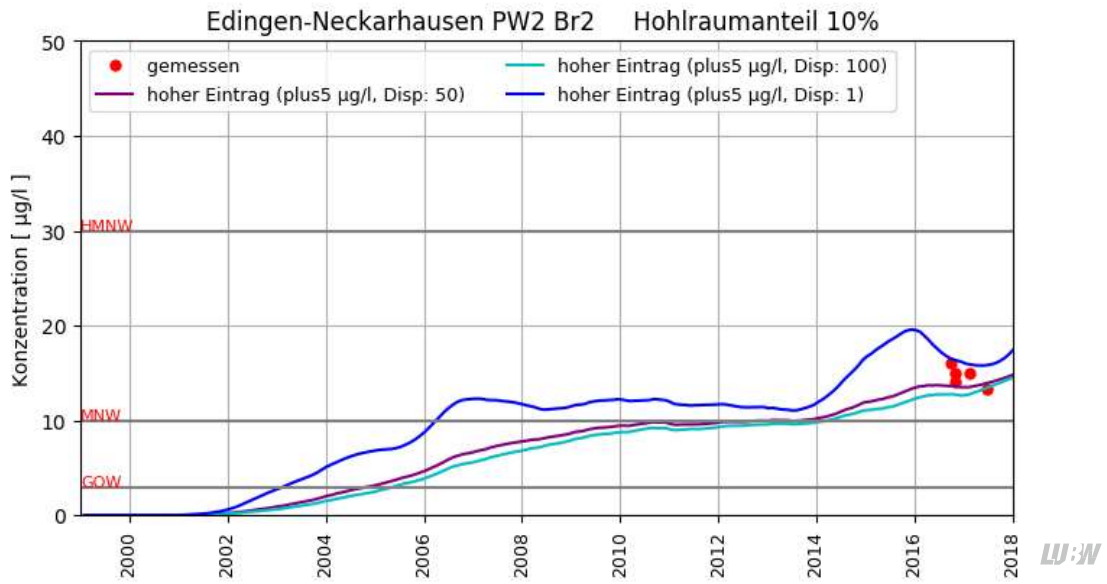


Abbildung 8.3: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

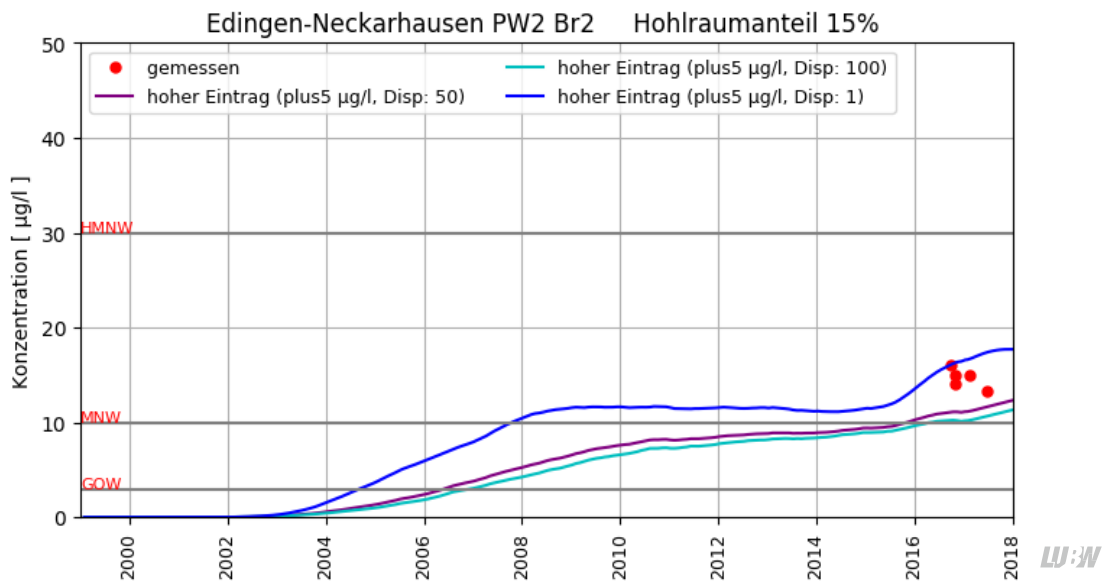


Abbildung 8.4: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

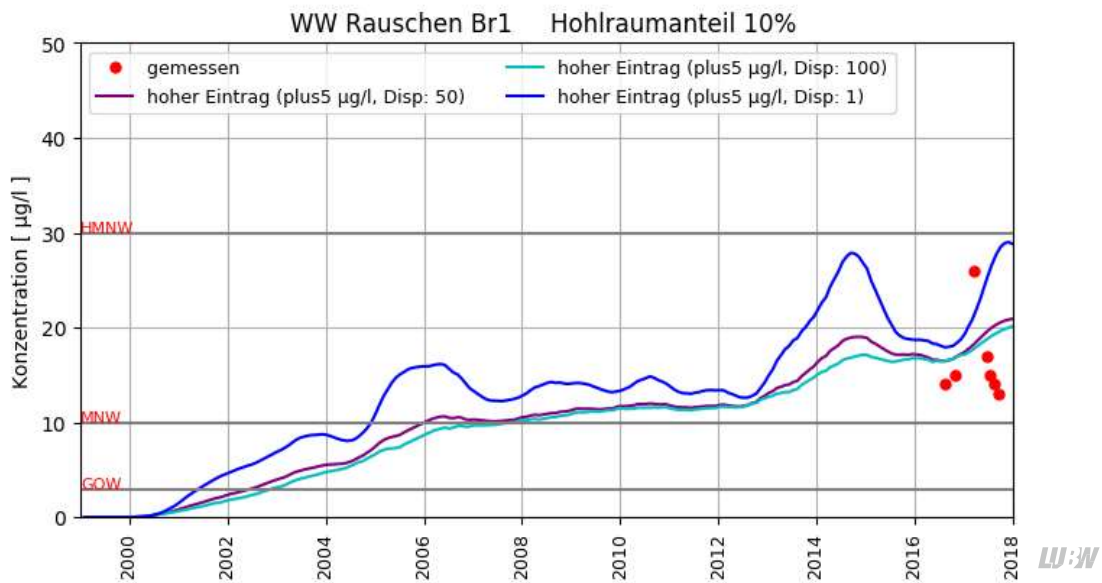


Abbildung 8.5: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

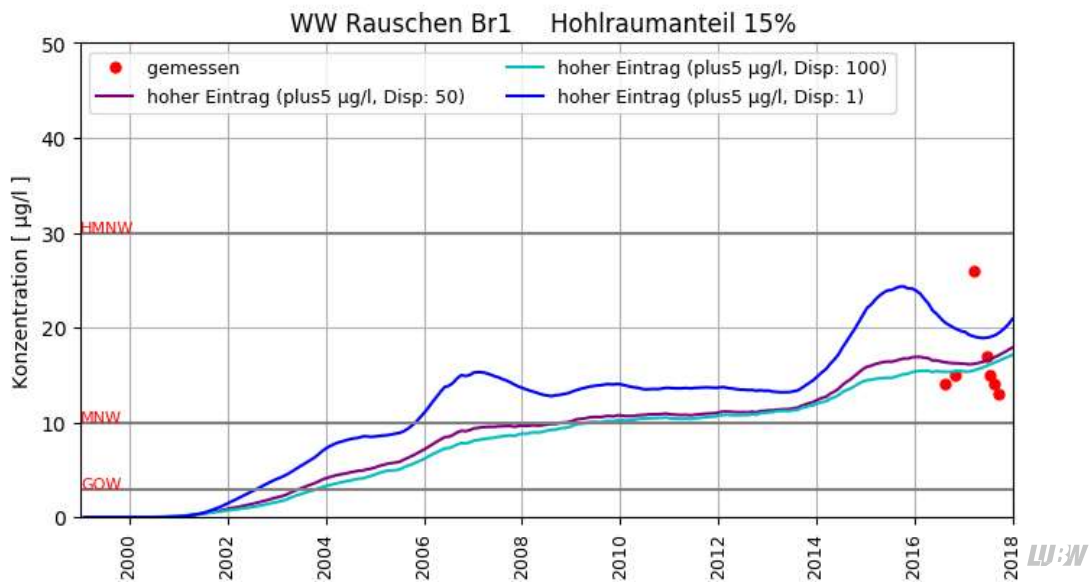


Abbildung 8.6: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

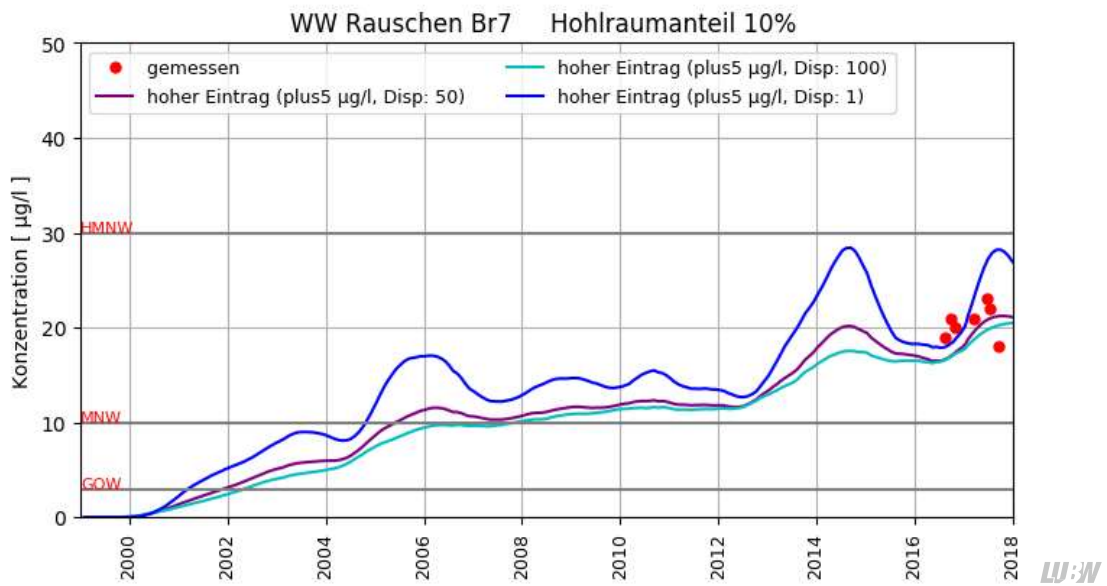


Abbildung 8.7: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

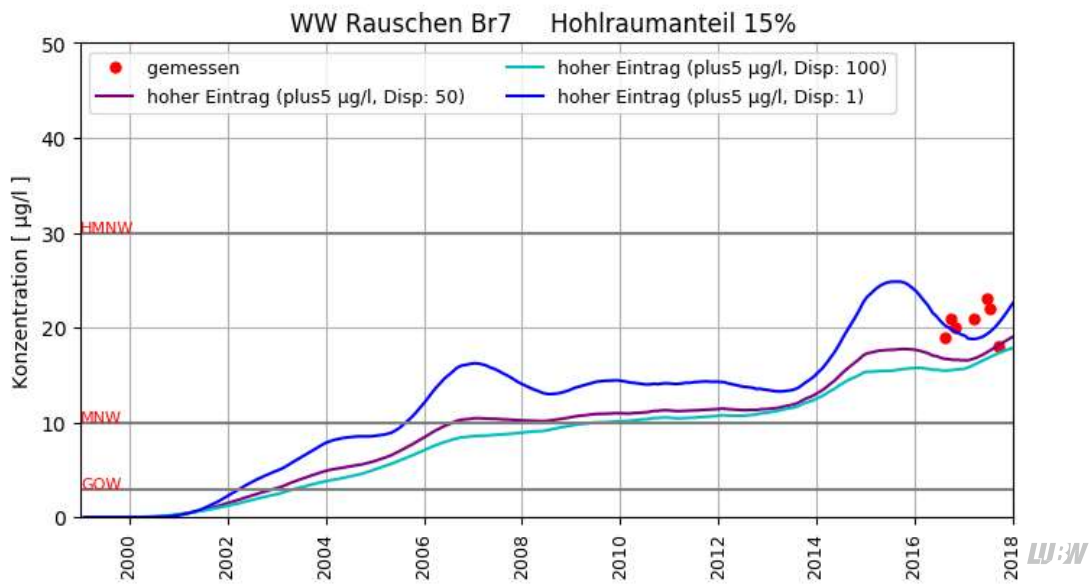


Abbildung 8.8: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

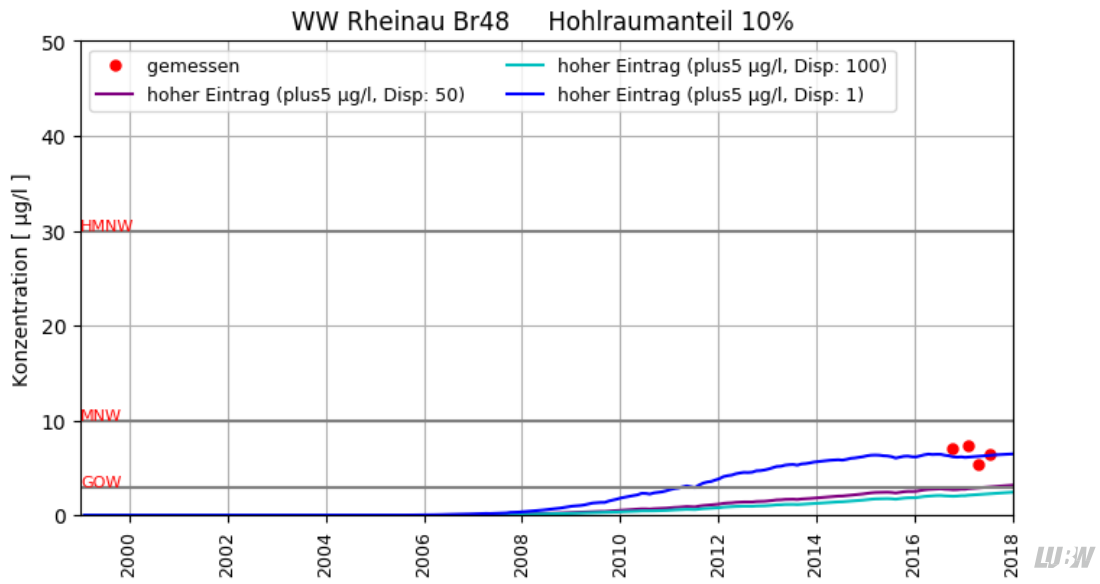


Abbildung 8.9: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

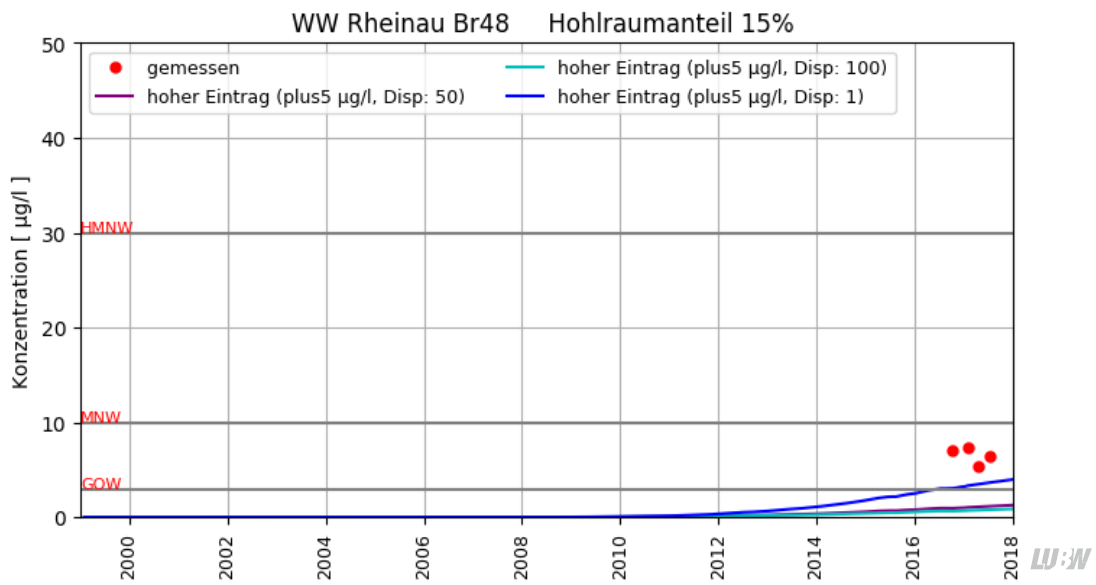


Abbildung 8.10: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

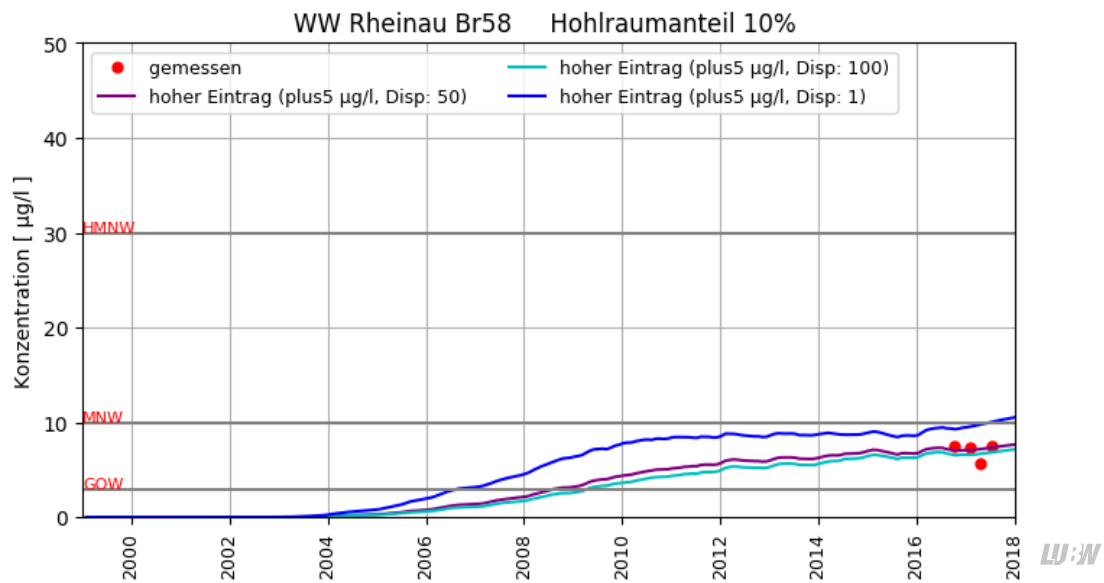


Abbildung 8.11: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

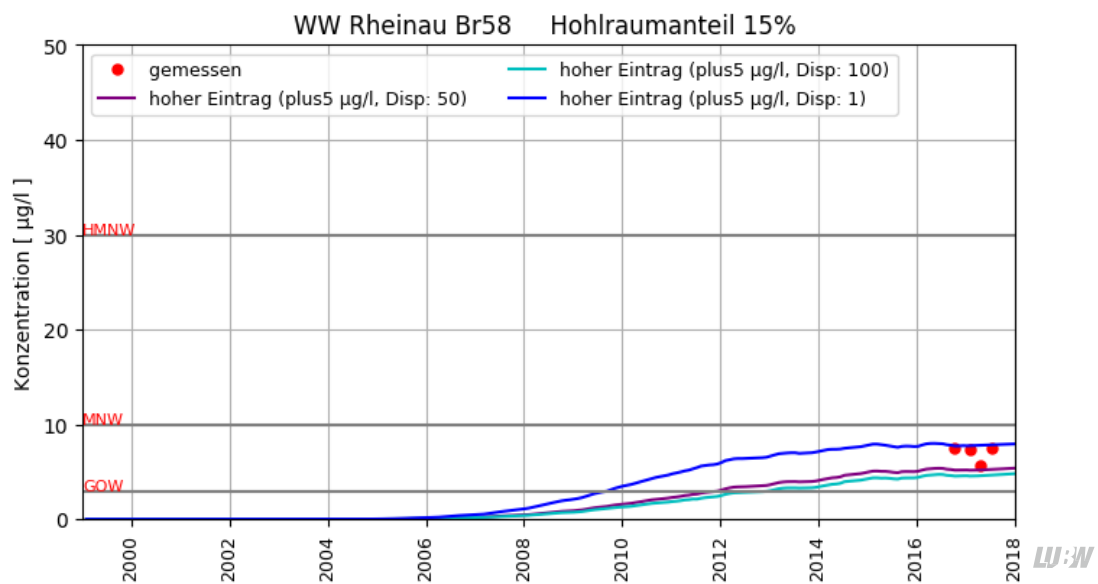


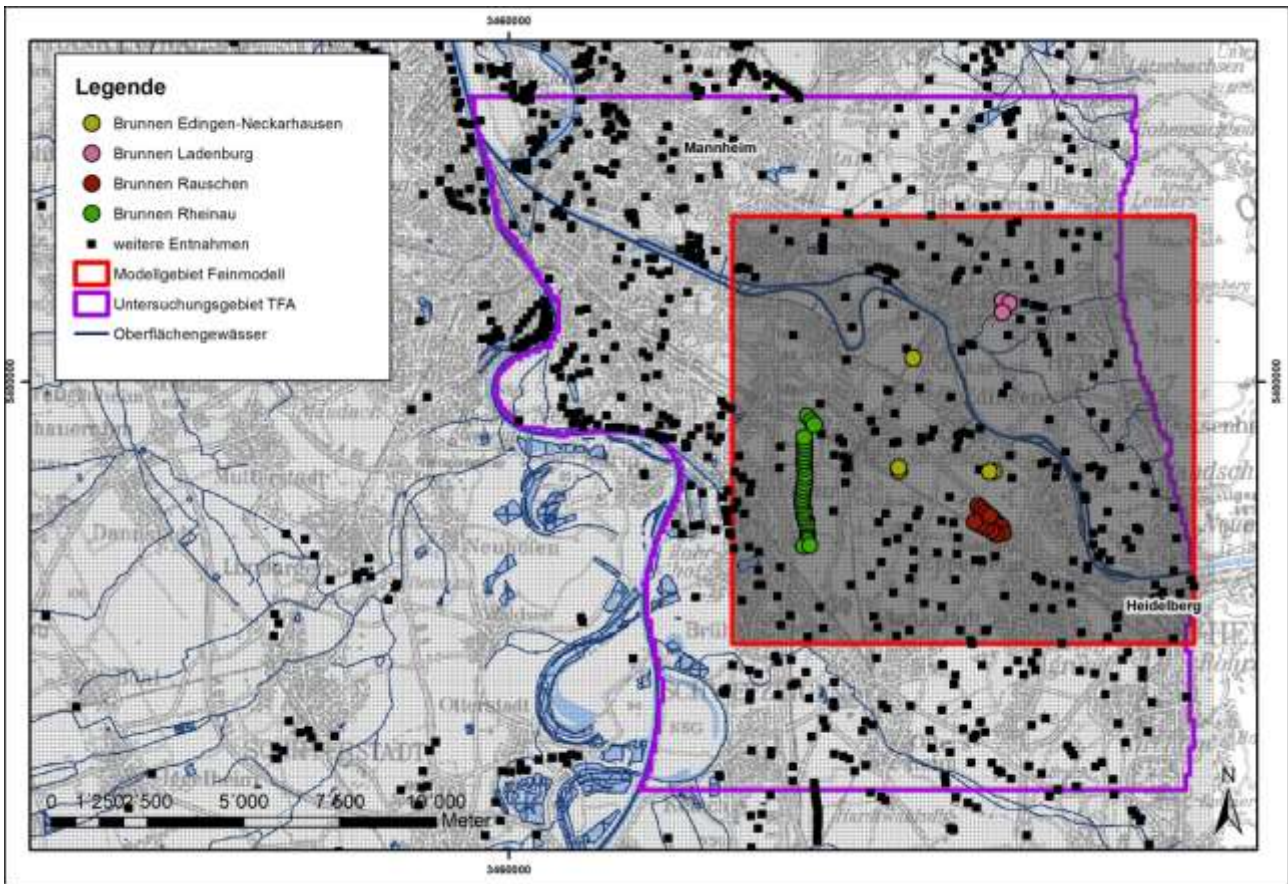
Abbildung 8.12: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

9 Sensitivitätsanalyse mit lokal verfeinertem Modell

9.1 MODELLAUFBAU

Das großräumige Modell basiert auf einem quadratischen Modellraster mit Seitenlängen von 100 m. Damit lassen sich die großräumigen Strömungs- und Transportvorgänge im Untersuchungsraum abbilden. Neckar-nahe Verhältnisse oder kurzfristige Extremereignisse lassen sich mit dieser vergleichsweise groben Auflösung nur näherungsweise abbilden. Kurzfristige Konzentrationsspitzen im Neckar werden durch die grobe Diskretisierung innerhalb einer 100x100 m Modellzelle im Grundwasser gemittelt. Bei Entfernungen von mehreren Kilometern spielt dies keine Rolle mehr, da die hydrodynamische Dispersion zu einer Vermischung im Bereich der scharfen Fronten führt. Der gewählte Ansatz mit Längsdispersivitäten von 50 bis 100 m führt in diesem Maßstab zu keiner zusätzlichen numerischen Dispersion. Neckarnah ist auf Grund der kurzen Transportwege von einer kleineren hydrodynamischen Dispersion in der Größenordnung von 1 bis 10 m auszugehen. Dies lässt sich nicht mit einem 100 m Raster abbilden, wie auch die Sensitivitätsstudie gezeigt hat.

Aus diesem Grund wurde ein lokal verfeinertes Grundwassermodell für den östlichen Rhein-Neckar-Raum gemäß Abbildung 9.1 erstellt. Hier wurde ein in das großräumige Grundwassermodell eingehängtes Lokalmodell mit einer Modellnetzauflösung von 10x10 m erstellt. An den Modellrändern wurde dieses mit dem Strömungsmodell des großräumigen Modells gekoppelt und die räumlich hochaufgelöste Grundwasserströmung berechnet. Auf dieser Basis erfolgte die Simulation des Transports von TFA über die Neckarinfiltration ins Grundwasser. Beim Transport wurde eine Längsdispersivität von 10 m angesetzt, um zu überprüfen, wie sich die scharfen Fronten von TFA-Konzentrationen im zeitlichen Verlauf im Grundwasser abbilden.

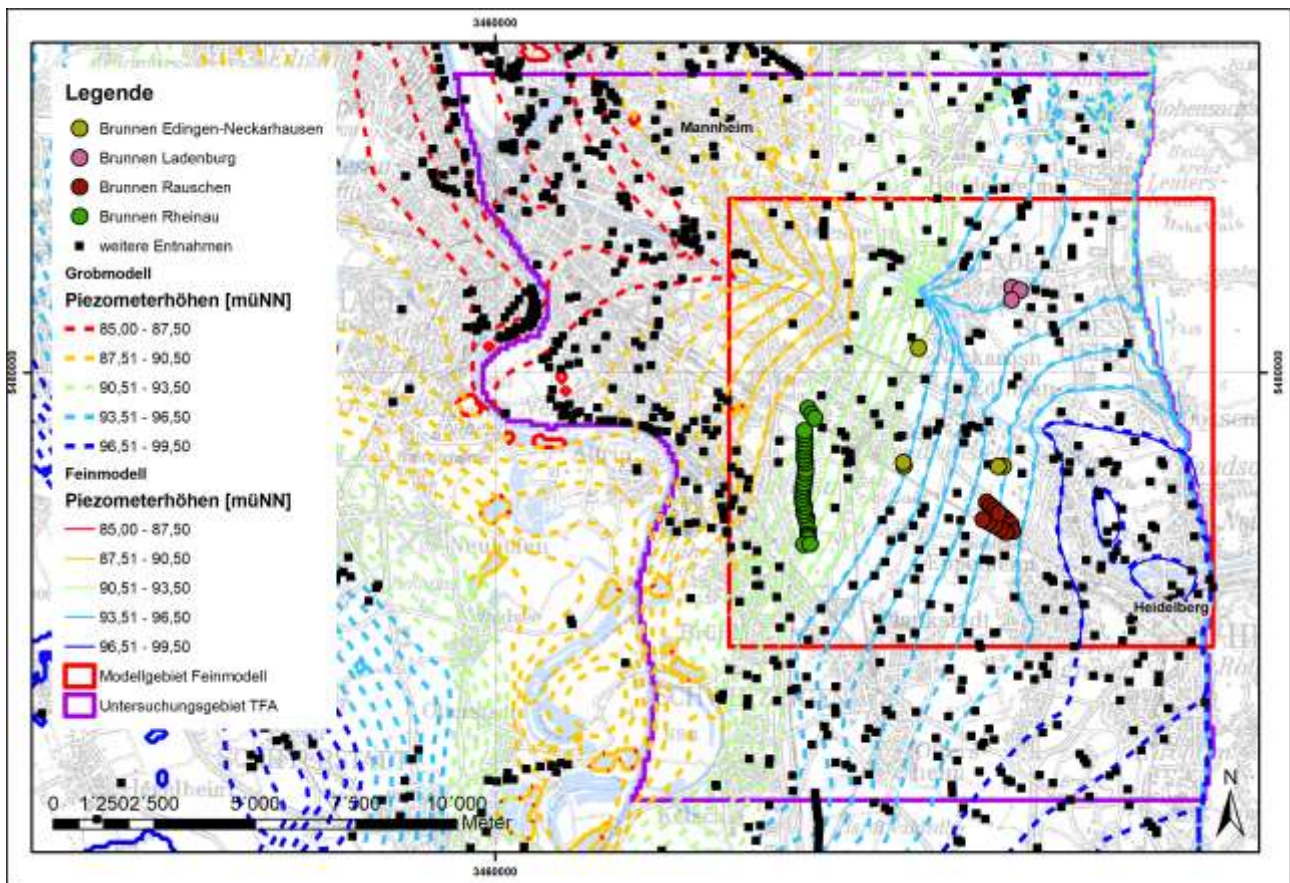


LU:W

Abbildung 9.1: Lage des lokal verfeinerten Modells im Untersuchungsraum

9.2 GRUNDWASSERSTRÖMUNG

Die Grundwasserströmung im Lokalmodell wurde durch Kopplung an den Modellrändern mit dem regionalen Modell berechnet. An den Modellrändern wurde dabei die im großräumigen Modell berechnete Piezometerhöhe als Festpotenzialrandbedingung angesetzt. Die Randbedingungen im Modell wurden als Zu- und Abflussrandbedingungen gemäß den im großräumigen Modell berechneten Raten angesetzt. Mit dieser Kopplung ergeben sich die in Abbildung 9.2 beispielhaft für Dezember 2016 dargestellten Isolinien der Piezometerhöhen im großräumigen Modell und im Lokalmodell. Es zeigt sich, dass nur marginale Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Diskretisierung in der Grundwasserströmung entstehen.



LU:W

Abbildung 9.2: Isolinen der berechneten Grundwasserhöhen im großräumigen Modell und im Lokalmodell für Dezember 2016

9.3 TFA-TRANSPORT

Basierend auf dem instationären Strömungsfeld im Lokalmodell wurde der TFA-Transport mit TFA-Eintrag über den Neckar im Lokalmodell simuliert. In Abbildung 9.3 bis Abbildung 9.10 sind die gemessenen und berechneten TFA-Konzentrationen an ausgewählten Brunnen von WVU im großräumigen Modell und im Lokalmodell dargestellt. Hier zeigt sich, dass die berechneten Ganglinien des Lokalmodells um die berechneten Ganglinien des regionalen Modells schwanken. Im Mittel passt der Verlauf des großräumigen Modells mit dem berechneten Ganglinienverlauf des Lokalmodells.

In den Ganglinien ist ein deutlicher Unterschied zwischen Lokal- und Regionalmodell im Nahbereich des Neckars zu erkennen. Erwartungsgemäß zeigt das Lokalmodell eine größere Schwankungsamplitude als das Regionalmodell. Am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen lässt sich damit die gemessene Schwankungsamplitude etwas besser erklären. An den Brunnen des Wasserwerks Rheinau sind die Ganglinien sehr ähnlich und weisen in beiden Fällen keine dominanten Schwankungen mehr auf. Dies bedeutet, dass nur neckarnah bei extremen TFA-Konzentrationen kurzfristig mit Schwankungen zu rechnen ist, die ca. 20 % über den bislang gemessenen Werten liegen können.

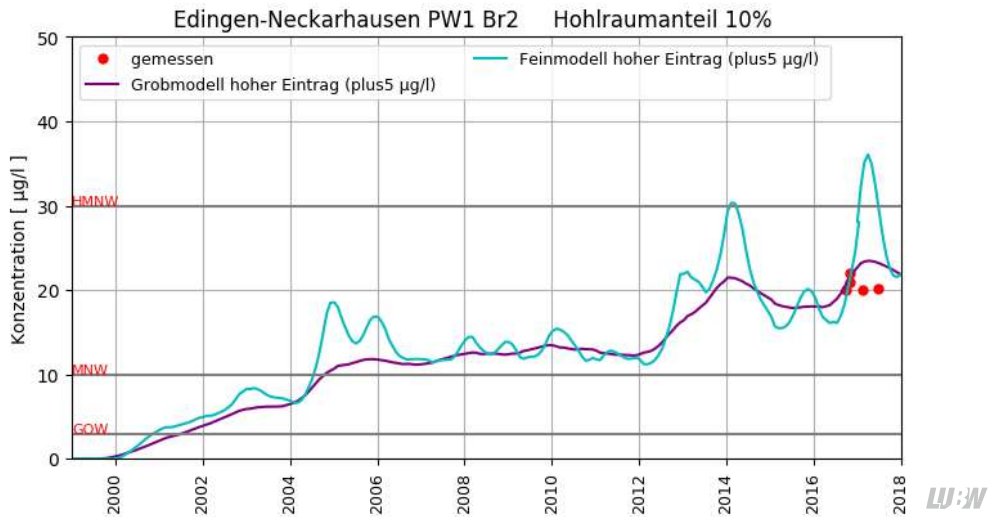


Abbildung 9.3: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

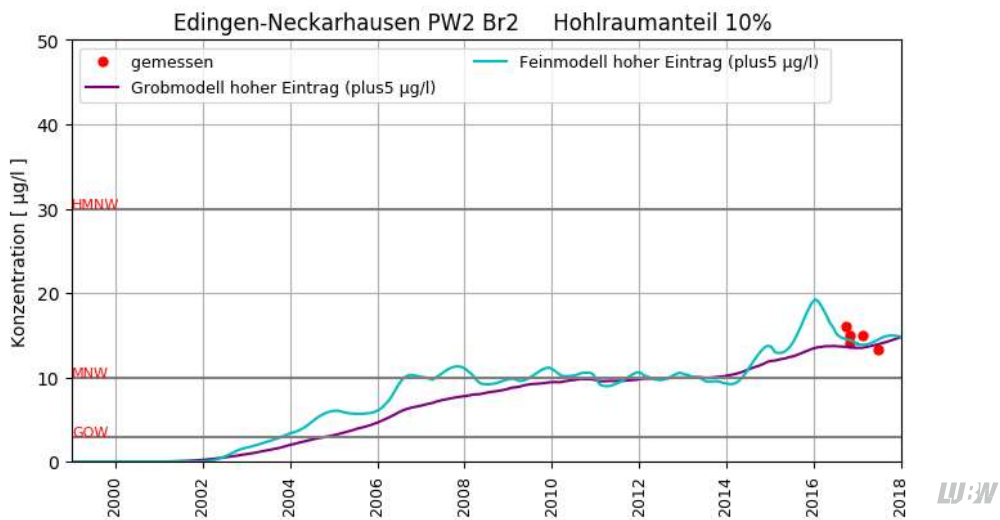


Abbildung 9.4: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

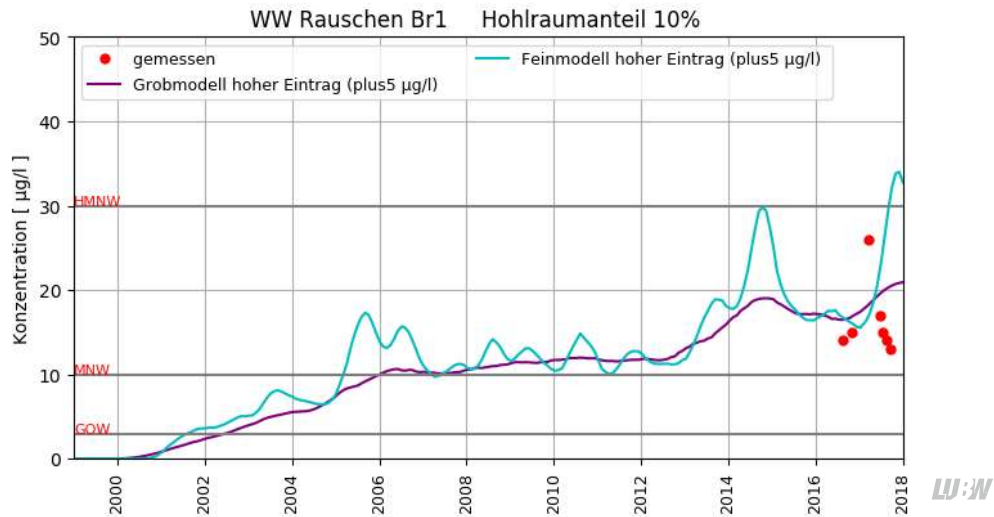


Abbildung 9.5: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

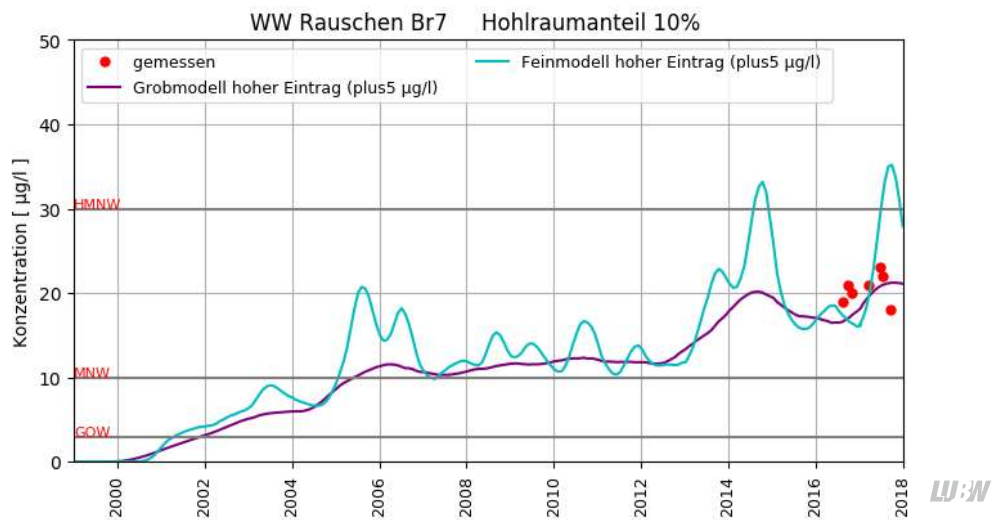


Abbildung 9.6: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

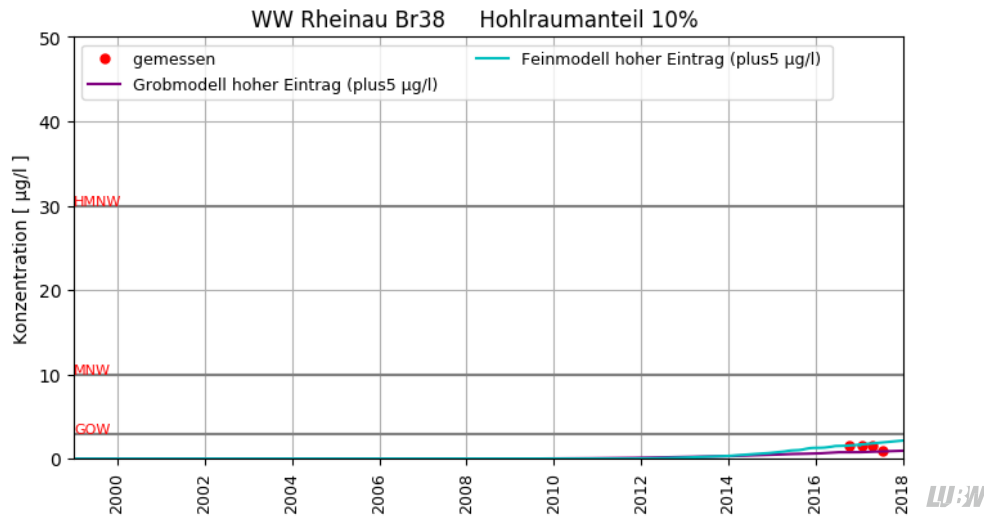


Abbildung 9.7: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

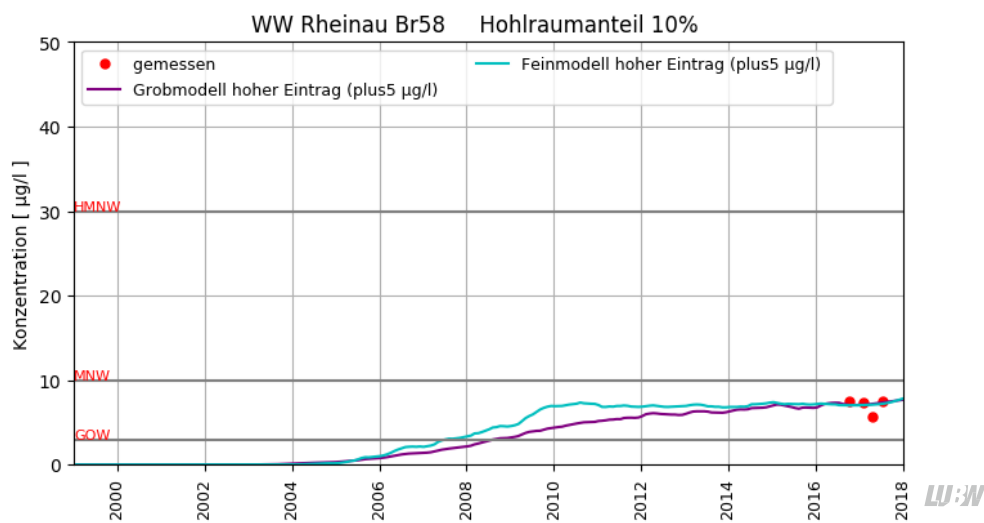
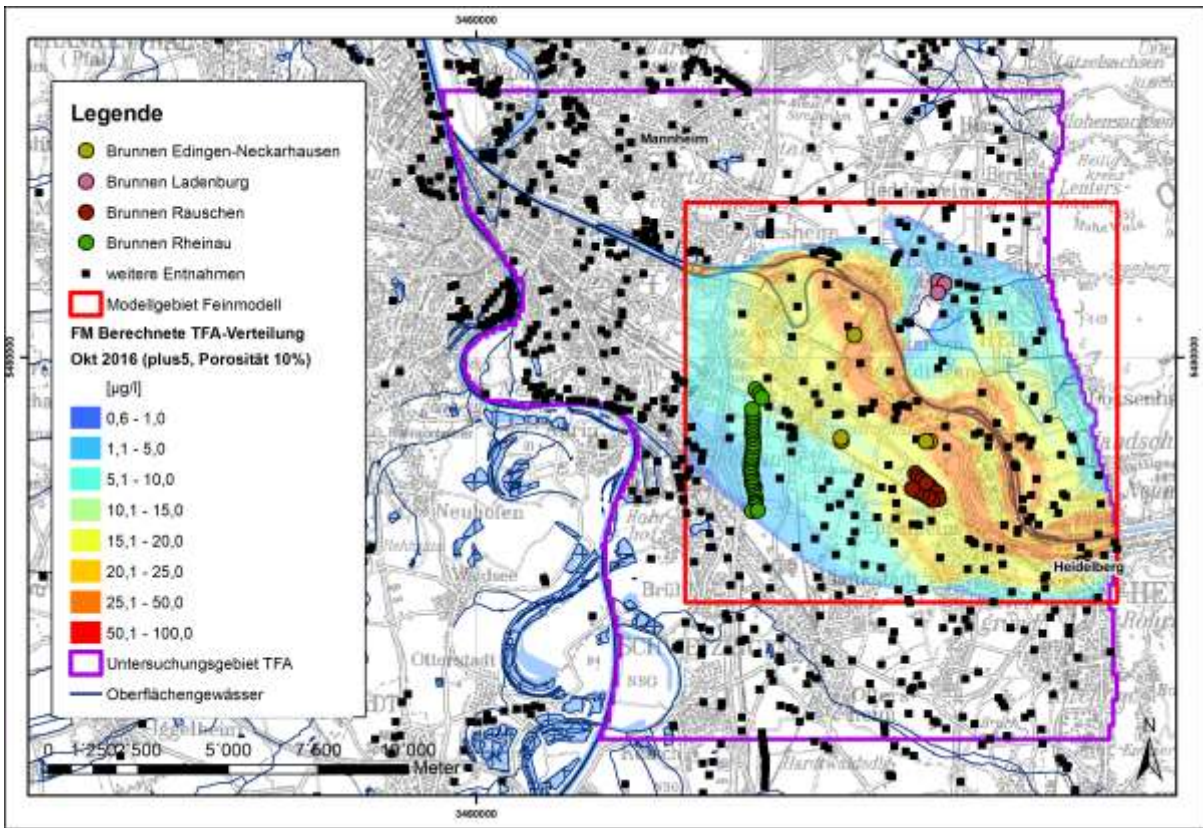


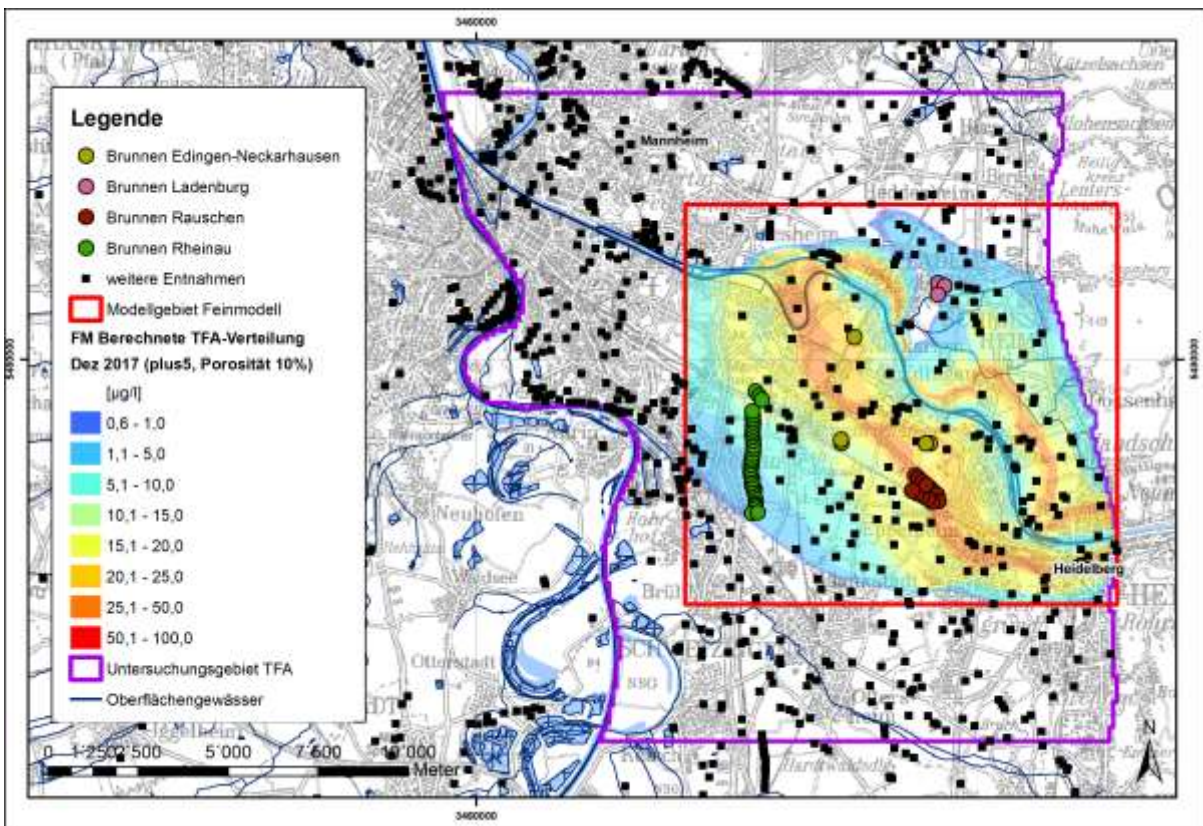
Abbildung 9.8: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Im Lokalmmodell wurden auch die berechneten TFA-Verteilungen ausgewertet und mit jenen im Regionalmodell verglichen. Abbildung 9.9 und Abbildung 9.10 zeigen die berechneten TFA-Verteilungen im OGWL im Oktober 2016 und Dezember 2017. Die generelle Verteilung im Lokalmmodell passt sehr gut zu der im Regionalmodell. Lokal, insbesondere in Neckarnähe, sind Unterschiede erkennbar, die auf die unterschiedliche Diskertisierung und die unterschiedlichen Dispersivitäten zurück zu führen sind. Im Lokalmmodell wurde eine Längsdispersivität von 10 m und im großräumigen Modell von 50 m angesetzt.



LU:W

Abbildung 9.9: Berechnete TFA-Verteilung des Feinmodells im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 10 %



LU:W

Abbildung 9.10: Berechnete TFA-Verteilung des Feinmodells im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 10 %

10 Prognose der TFA-Verhältnisse

10.1 DEFINITION DER SZENARIEN FÜR DEN TFA-EINTRAG IN DEN NECKAR

Für die Prognose der TFA-Verhältnisse in der Zukunft wurden 5 Szenarien definiert, die von unterschiedlichen Eintragsraten an TFA in den Neckar ausgehen. Die TFA-Eintragsraten in den Neckar sind in Tabelle 10.1 zusammen mit den Konzentrationen im Neckar bei MNQ und MQ dargestellt. In den Szenarien variieren die Eintragsraten zwischen keiner Emission und maximal 4,3 kg TFA pro Stunde. Aus diesen Eintragsraten ergeben sich TFA-Konzentrationen im Neckar bei Niedrigwasser von bis zu 30 µg/l und bei Mittelwasser beträgt die maximale TFA-Konzentration im Neckar 8,6 µg/l. Da der Neckar eine Hintergrundkonzentration von 1 µg/l aufweist wurde diese Hintergrundkonzentration der TFA-Konzentration im Neckar jeweils hinzugezählt.

Tabelle 10.1: Definition der Szenarien für die TFA-Prognoserechnungen

Szenario	TFA-Eintrag kg/h	TFA-Konzentration [µg/l] im Neckar bei			
		MNQ 40 m³/s	MQ 139 m³/s	MNQ zzgl. 1 µg/l	MQ zzgl. 1 µg/l
1	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
2	0,5	3,5	1,0	4,5	2,0
3	0,8	5,6	1,6	6,6	2,6
4	2,0	13,9	4,0	14,9	5,0
5	4,3	29,9	8,6	30,9	9,6

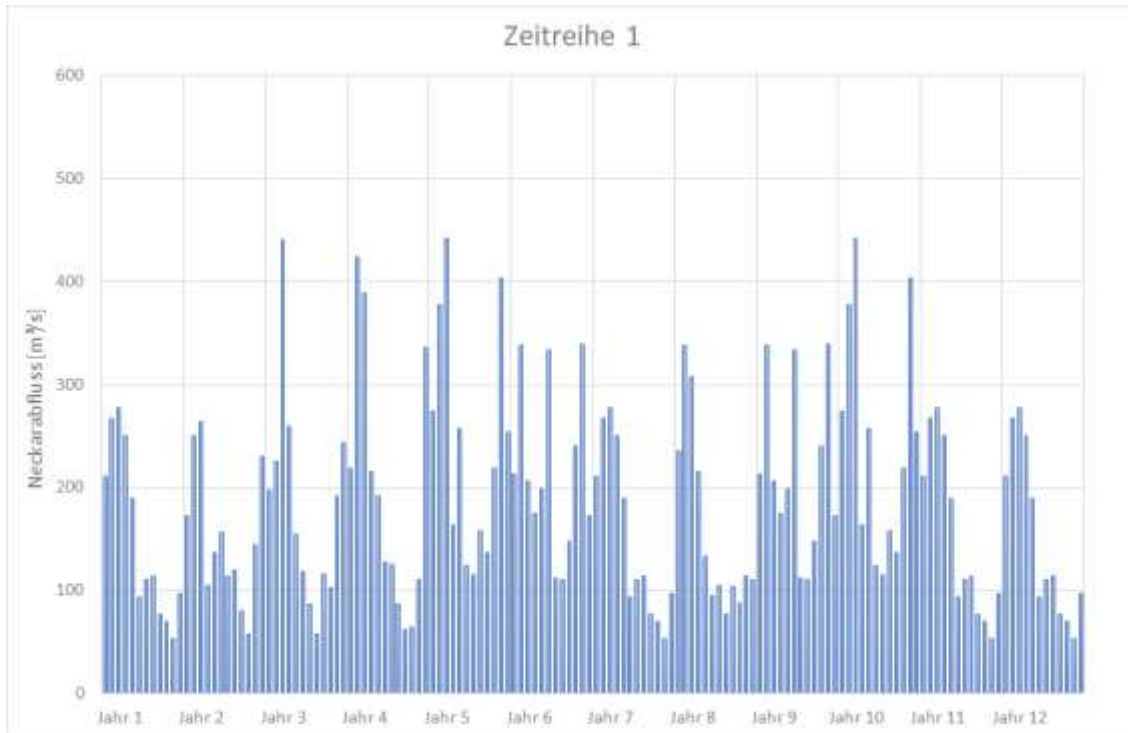
LUBW

Für die Wasserversorgungsbrunnen, die fast ausschließlich Neckarwasser entnehmen entspricht die TFA-Konzentration im Neckar näherungsweise der TFA-Konzentration im Brunnen. Bei Brunnen, die nur einen gewissen Anteil an Neckaruferfiltrat entnehmen errechnet sich die mittlere TFA-Konzentration im Brunnen aus der TFA-Konzentration im Neckar multipliziert mit dem Anteil an Neckarwasser in der Entnahme. Aufgrund der hydrologischen Schwankungen des Neckarabflusses kann es bei Niedrigwasserverhältnissen und konstantem Eintrag zu TFA-Konzentrationsspitzen im Grundwasser kommen, die sich auf Grund der hydrodynamischen Dispersion im Grundwasserleiter abbauen.

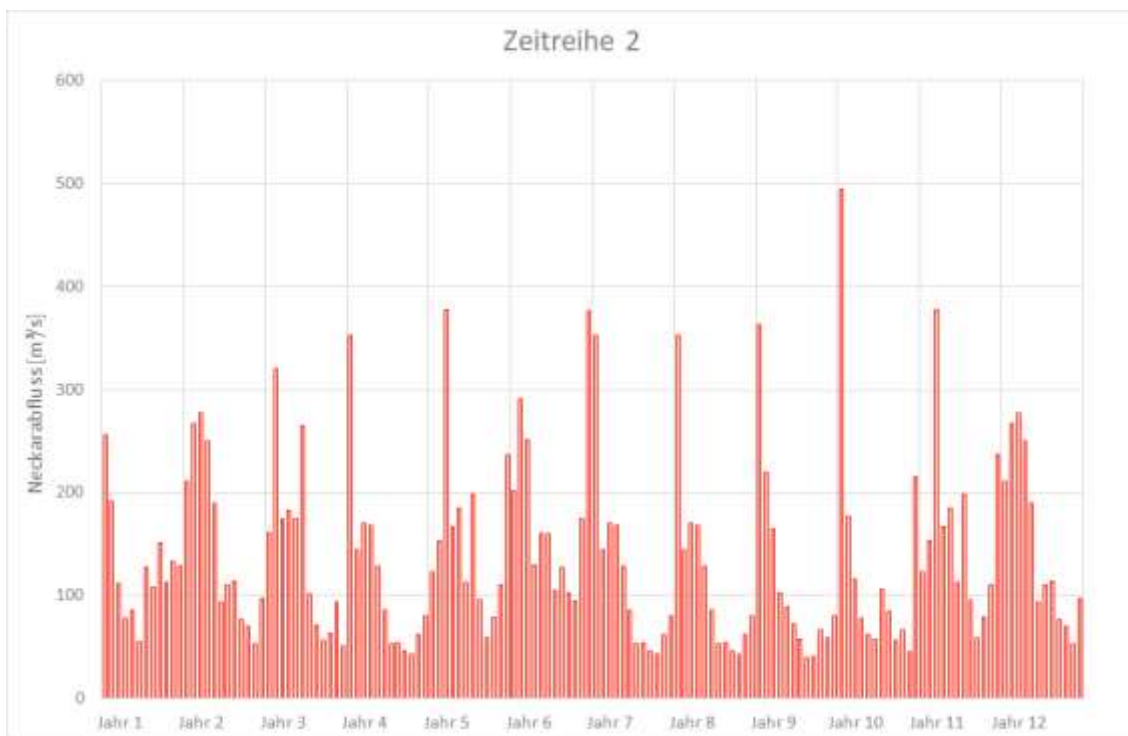
10.2 STOCHASTISCHE GENERIERUNG DER HYDROLOGISCHEN VERHÄLTNISSE

Da sich die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse nicht voraussagen lassen, wurden basierend auf den bisherigen hydrologischen Verhältnissen zukünftige Verhältnisse generiert. Dabei wurden die hydrologischen Eingangsgrößen Grundwasserneubildung und Neckarabfluss auf Jahresbasis stochastisch variiert und so Zeitreihen der Grundwasserneubildung und der Abflussverhältnisse für die Zukunft generiert. Bei der stochastischen Generierung auf Jahresbasis wurden die monatlichen hydrologischen Eingangsgrößen jeweils eines Jahres verwendet und so Zeitreihen bis 2050 generiert, die aus zufällig gewürfelten Jahren aus der Vergangenheit zusammengesetzt wurden. Die Simulation erfolgte dann mit monatlich schwankenden hydrologischen Eingangsgrößen.

Beispielhaft sind in Abbildung 10.1 zwei Abflussganglinien des Neckars dargestellt, die für die Prognosebetrachtungen verwendet wurden. Diese Abflusszeitreihen setzen sich aus Jahreszeitreihen zwischen 1999 und 2016 zusammen, wobei die Abfolge der Jahre zufällig aus dem historischen Ensemble ausgewählt wurde. Für die Prognoserechnungen wurden so 12 Zeitreihen generiert, die den Zeitraum bis 2050 abdecken. Für die Grundwasserneubildung wurde dieselbe Vorgehensweise gewählt, wobei für die Neubildung und den Abfluss jeweils dasselbe Jahr angesetzt wurde, damit der Neckarabfluss und die Grundwasserneubildung hydrologisch zusammenpassen.



LUBW



LUBW

Abbildung 10.1: Zwei beispielhafte Abflussganglinien des Neckars für jeweils 12 Jahre als Basis für die Prognoserechnungen

10.3 TFA-GANGLINIEN

Mit Hilfe des kalibrierten Grundwassermodells wurden Prognoserechnungen der TFA-Verhältnisse zwischen 01.01.2018 und 31.12.2050 durchgeführt. Dabei wurde zunächst die instationäre Strömung auf Basis der stochastisch generierten hydrologischen Eingangsgrößen berechnet. Die Strömungsberechnungen erfolgten auf Monatsbasis. Die Grundwasserentnahmen wurden entsprechend den generierten Jahren im Modell verwendet.

Auf den instationären Strömungsfeldern wurden dann Transportberechnungen für TFA durchgeführt, wobei die in Kap. 10.1 definierten 5 Szenarien betrachtet wurden. Die Modellsimulationen wurden für einen Hohlraumanteil von 10 % und mit einer Längsdispersivität von 50 m durchgeführt, da hierfür die beste Modellanpassung des TFA-Transports im Rahmen der Kalibrierung erzielt wurde. Als Startverteilung der TFA-Konzentration wurden die Verhältnisse des Modelllaufs mit einem hoch abgeschätzten TFA-Eintrag zuzüglich 5 µg/l TFA im Neckar verwendet. Dieser Modelllauf hat die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten TFA-Konzentrationen gezeigt.

In Abbildung 10.2 bis Abbildung 10.17 sind die Ganglinien der Prognoserechnungen zusammen mit den gemessenen TFA-Konzentrationen und die mit dem Modell berechnete historische Entwicklung der TFA-Konzentrationen dargestellt. Der simulierte historische Verlauf der TFA-Konzentration für hoch abgeschätzten Eintrag und hoch abgeschätzten Eintrag zuzüglich 5 µg/l bzw. 10 µg/l TFA-Konzentration im Neckar ist in den Diagrammen jeweils ergänzt.

Aus Darstellungsgründen wurden jeweils zwei Abbildungen erzeugt, die sich in den Szenarien unterscheiden. Da die Prognoserechnungen der einzelnen Szenarien aus 12 hydrologischen Varianten bestehen, ergibt sich für jedes Szenario eine Bandbreite für die zu erwartenden TFA-Ganglinien. Die jeweils größte Bandbreite wird für das Szenario 5 berechnet, da in diesem Szenario die meiste TFA-Masse in den Grundwasserleiter eingetragen wird und die TFA-Konzentration im Neckar auf Grund der hydrologischen Variation am meisten schwankt.

Erwartungsgemäß sind die TFA-Konzentrationen beim Szenario 1 am kleinsten und beim Szenario 5 am größten. Da bei allen Szenarien der TFA-Eintrag geringer ist als der historische Eintrag bis Oktober 2016 zeigen insbesondere die neckarnahen Brunnen einen deutlichen Rückgang.

Der Zeitversatz, bis die TFA-Konzentrationen deutlich abgesunken sind entspricht der in Kap. 6.3 ermittelten Laufzeit von Neckarwasser bis zu den einzelnen Brunnen. Je weiter ein Brunnen vom Neckar entfernt ist, um so flacher fällt das Abfallen der TFA-Konzentrationen aus. Dies wird beim Vergleich der prognostizierten TFA-Konzentrationen zwischen Pumpwerk 1 und 2 der Brunnen von Edingen-Neckarhausen deutlich. Während an den Brunnen des PW1 die TFA-Konzentrationen direkt mit Beginn der Prognose fallen, zeigen die TFA-Konzentrationen der Brunnen vom PW2 noch einen Anstieg, bis die Konzentration fällt. Auch an den Brunnen des Wasserwerks Rauschen ist ein zeitnaher Rückgang der TFA-Konzentrationen zu erwarten.

An den Brunnen des Wasserwerks Rheinau ist auf Grund der großen Laufzeiten zwischen Neckar und Wasserwerksbrunnen in den nächsten Jahren noch ein Anstieg der TFA-Konzentration zu erwarten. Entsprechend den ermittelten Laufzeiten von Stoffen aus dem Neckar kann insbesondere an den südlichen Brunnen die TFA-Konzentration auch erst in 10 Jahren zurückgehen.

Nach den Prognoserechnungen erreicht die TFA-Konzentration in Rheinau Maximalwerte, die in der Größenordnung des Maßnahmenwerts von 10 µg/l liegen. Eine Unterschreitung des aktuellen gesundheitlichen Orientierungswertes (GOW) von 3 µg/l ist bei allen Brunnen bei Szenario 2 zu erwarten. Bei Szenario 3 kann der GOW bis auf Brunnen 2 PW1 in Edingen Neckarhausen sowie an einzelnen Brunnen des Wasserwerks Rauschen auf lange Sicht eingehalten werden. Das Erreichen des GOW-Wertes ist in Abhängigkeit des Abstands der Brunnen zum Neckar meist erst in 10 bis 20 Jahren zu erwarten.

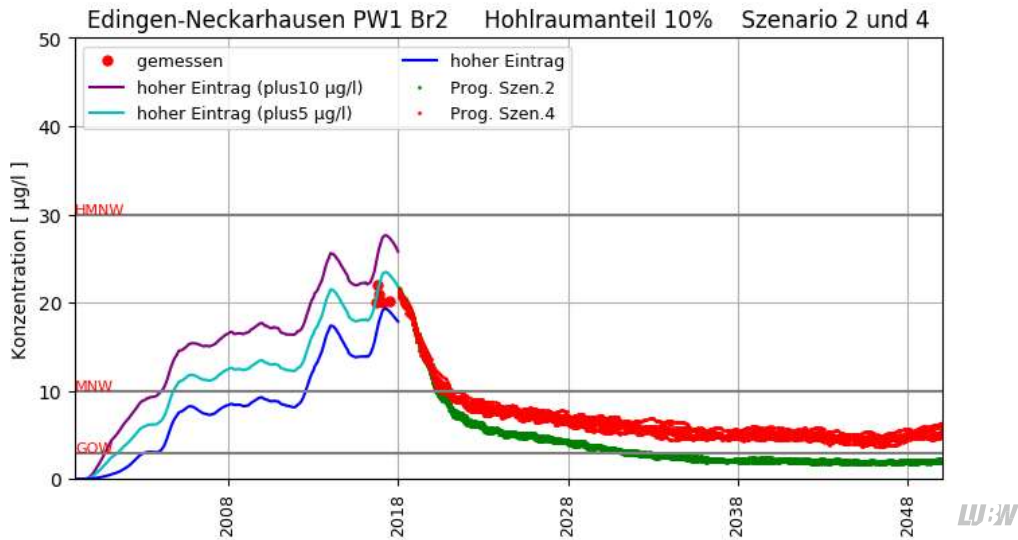


Abbildung 10.2: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

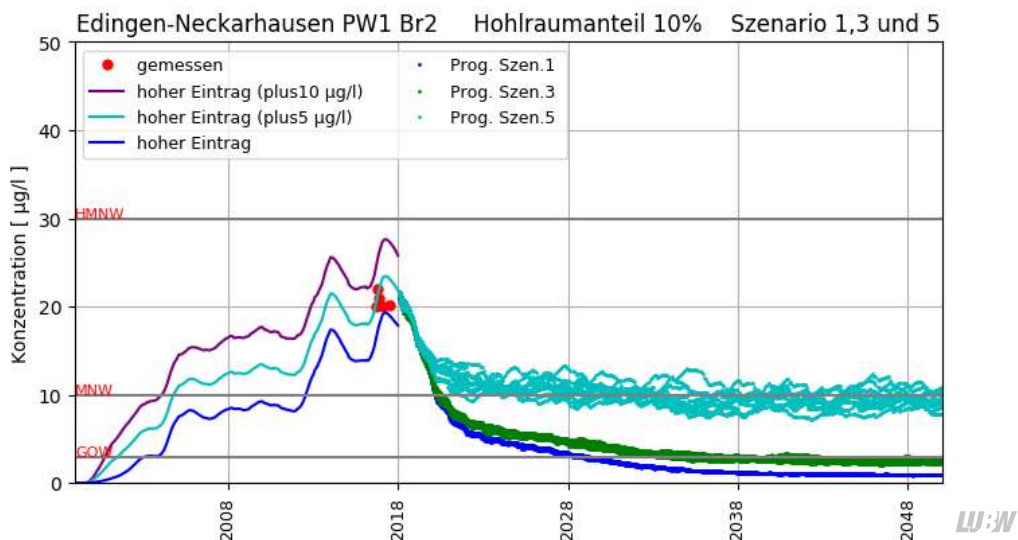


Abbildung 10.3: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

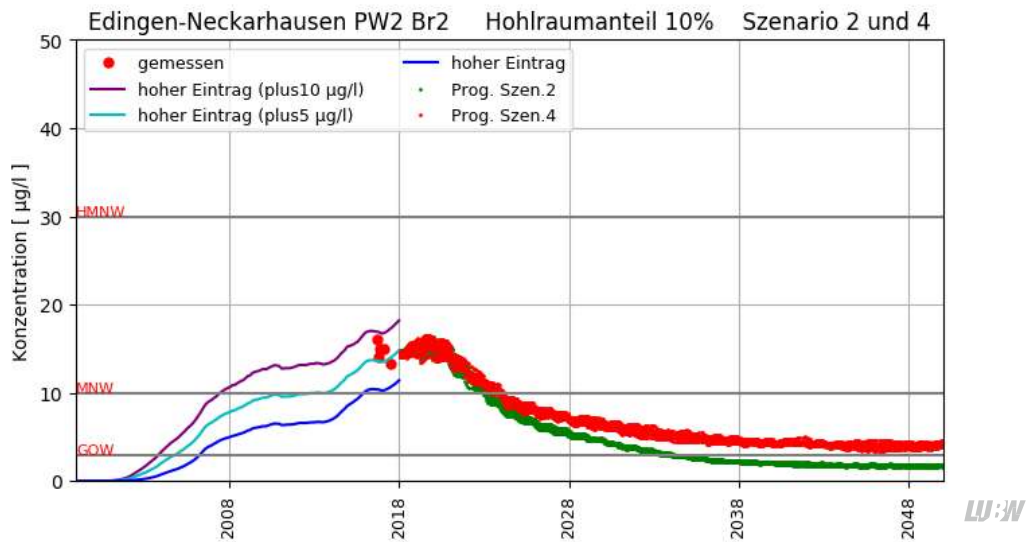


Abbildung 10.4: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

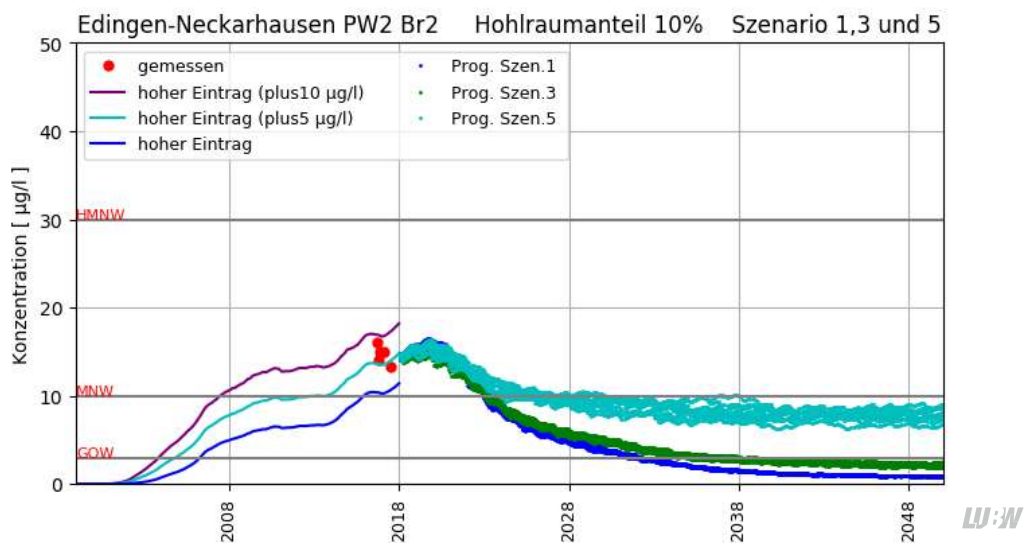


Abbildung 10.5: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

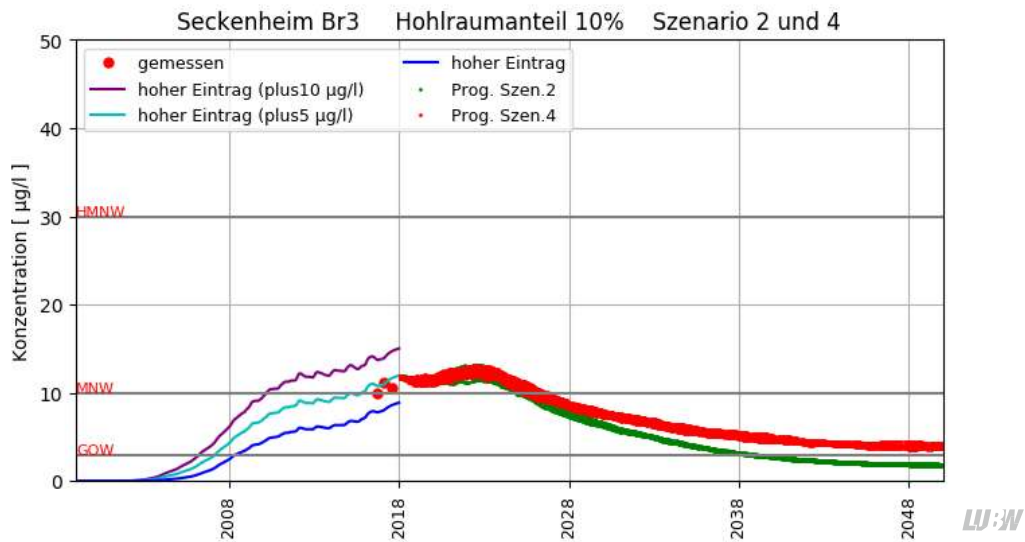


Abbildung 10.6: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

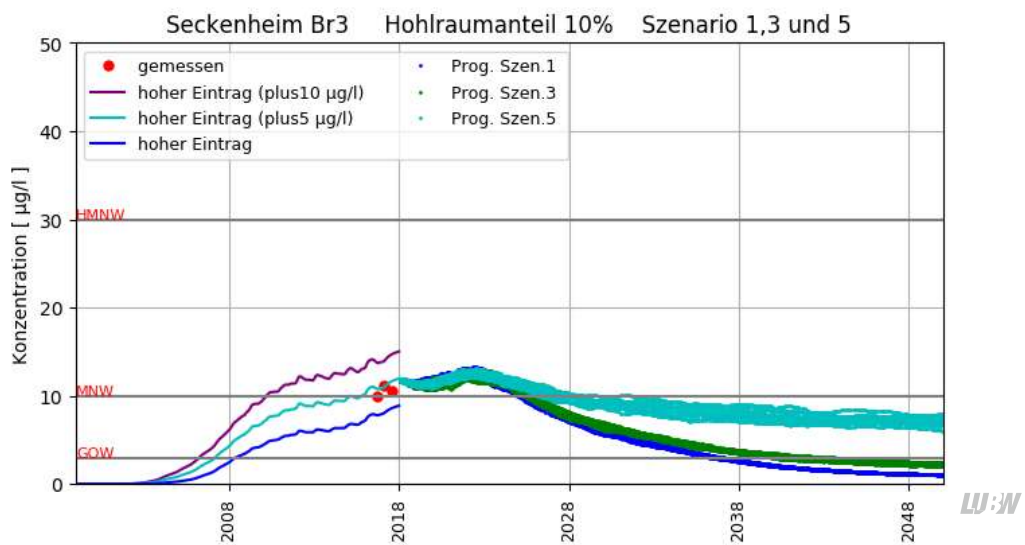


Abbildung 10.7: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

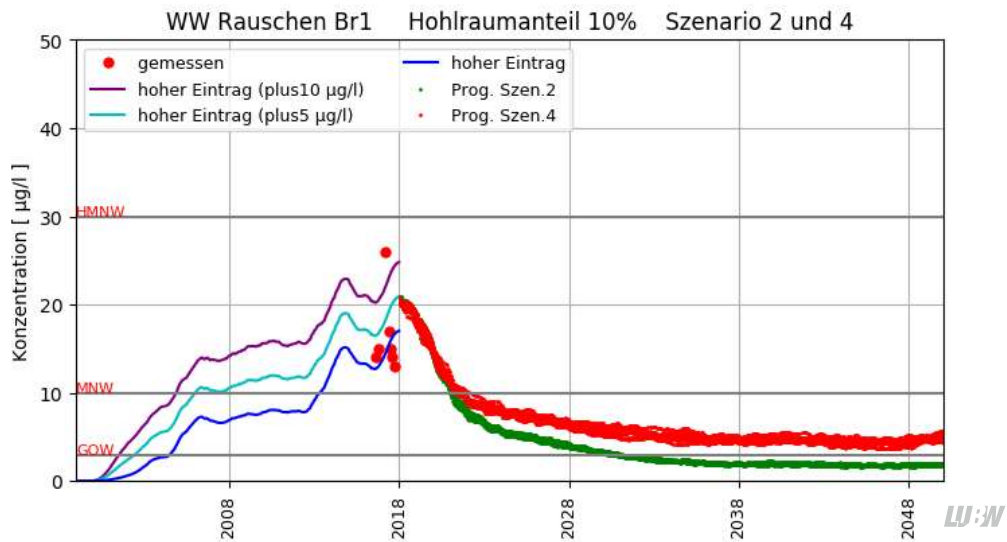


Abbildung 10.8: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

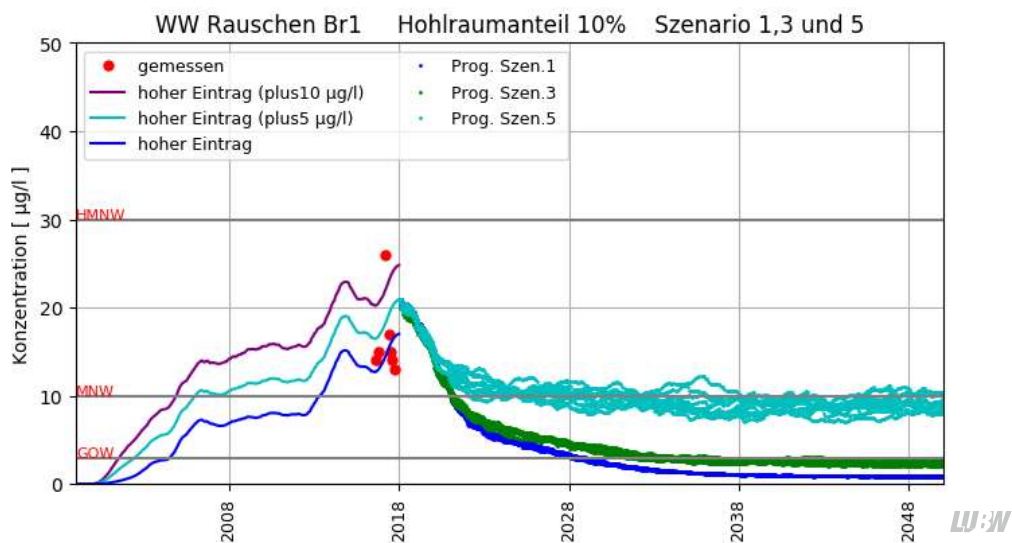


Abbildung 10.9: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

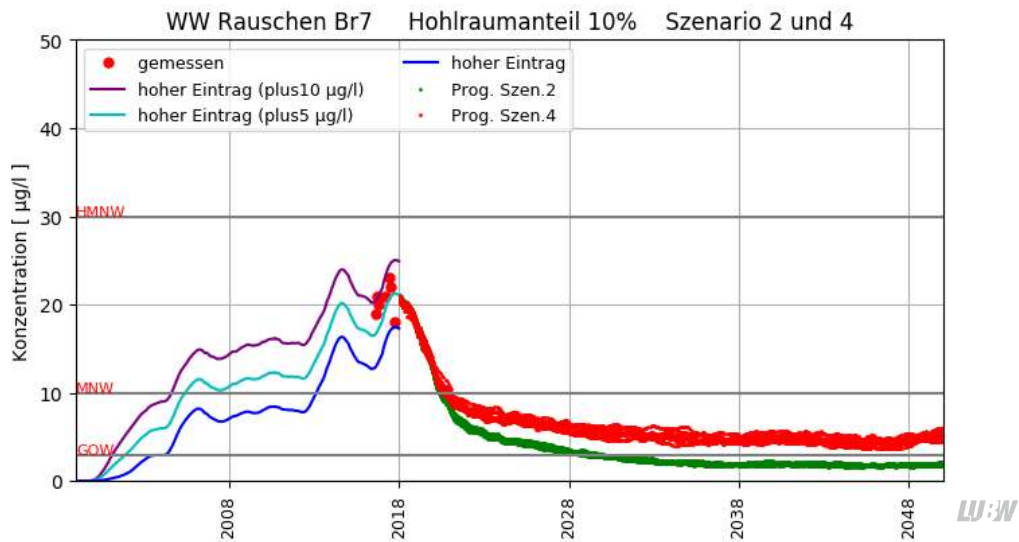


Abbildung 10.10: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

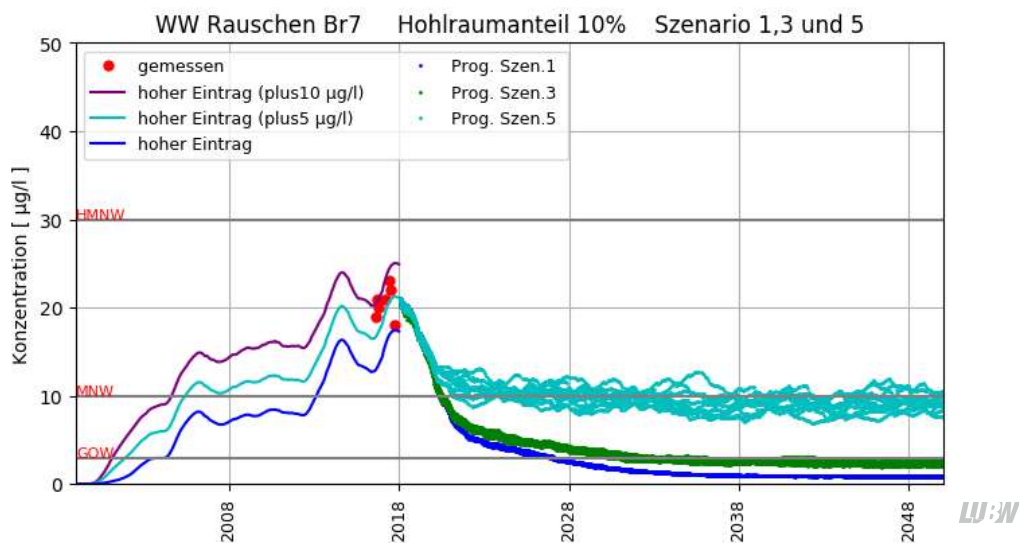


Abbildung 10.11: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

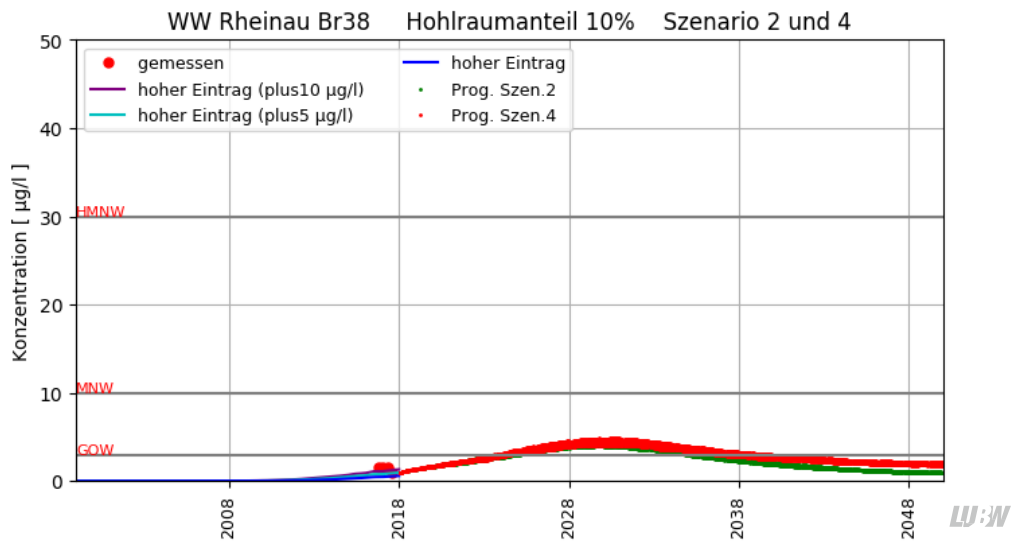


Abbildung 10.12: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

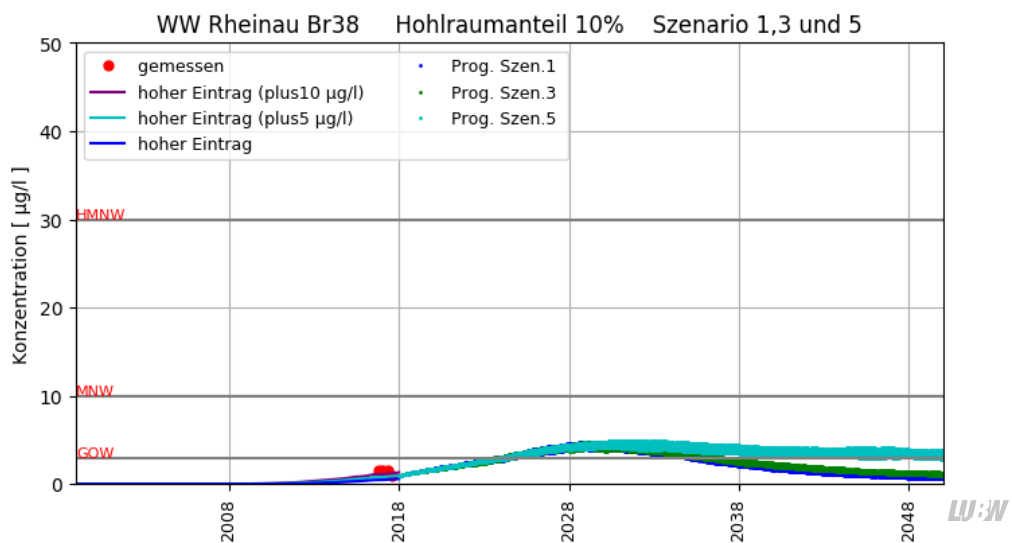


Abbildung 10.13: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

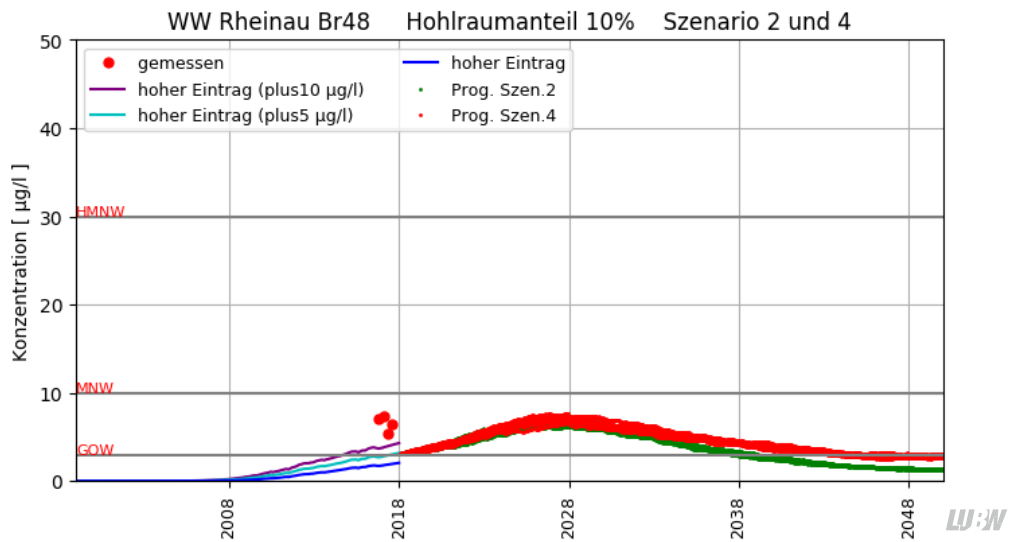


Abbildung 10.14: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

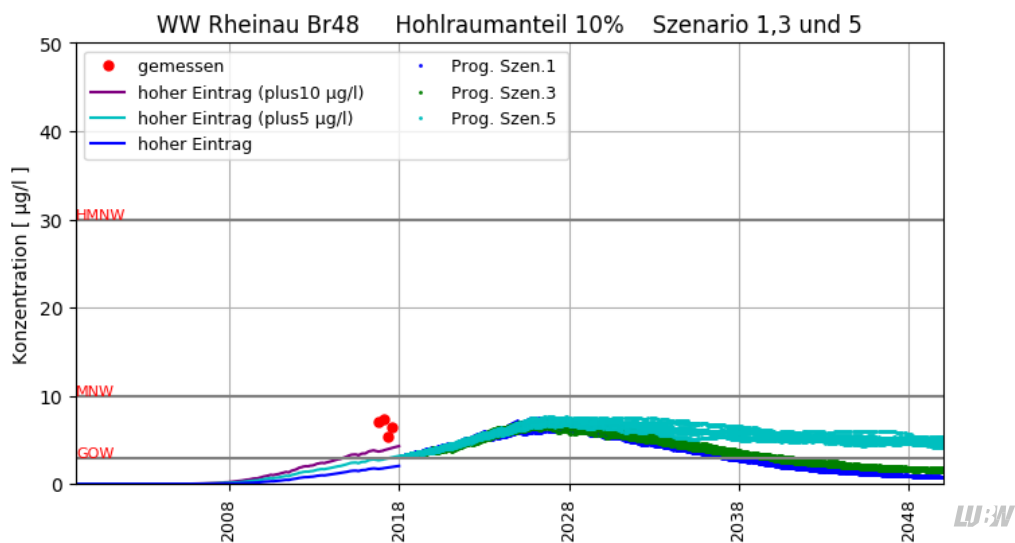


Abbildung 10.15: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

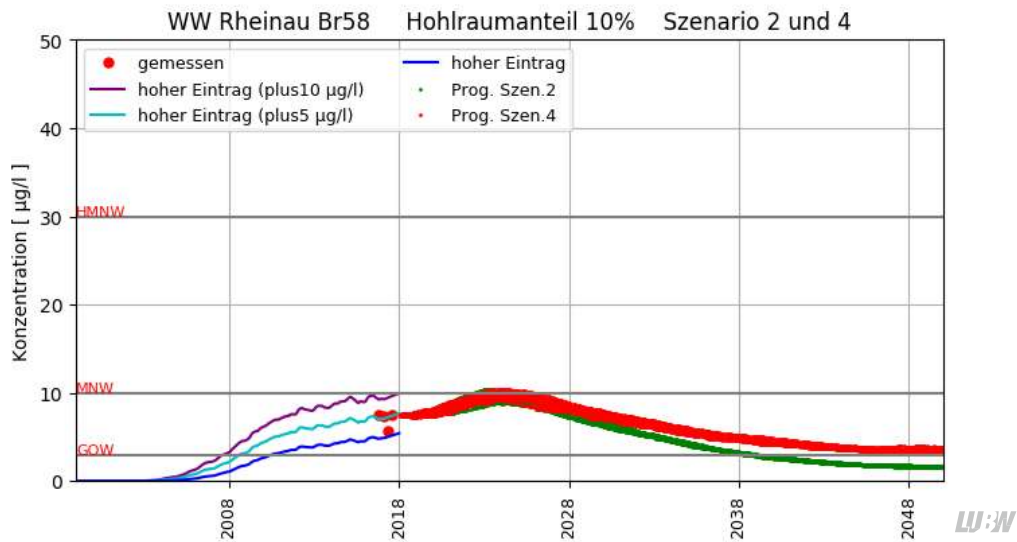


Abbildung 10.16: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

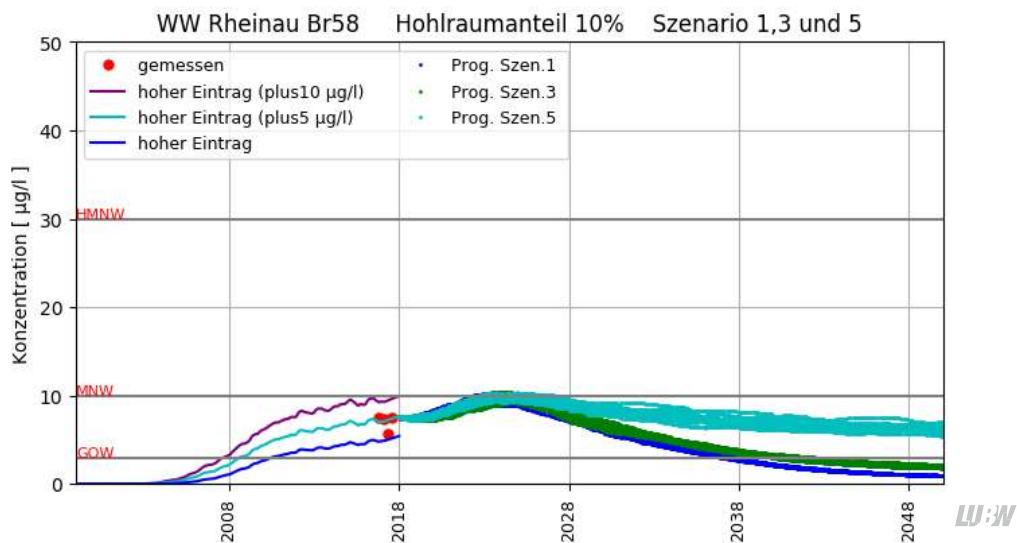


Abbildung 10.17: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

10.4 SENSITIVITÄTSBETRACHTUNG ZUM HOHLRAUMANTEIL

Für die Prognoserechnungen wurde eine Sensitivitätsstudie zum Hohlraumanteil durchgeführt, da die Porosität direkt die Laufzeit von Wasserinhaltsstoffen bestimmt und sich aus den Simulationen zum Salztransport auch etwas größere Hohlraumanteile als 10 % ableiten lassen. Im Rahmen der Sensitivitätsstudie wurde der Hohlraumanteil von 10 % auf 15 % erhöht. Beispielhaft sind in Abbildung 10.18 die prognostizierten TFA-

Ganglinien des neckarnahen Brunnens 2 vom PW1 Edingen-Neckarhausen dargestellt. Hier ist kein signifikanter Unterschied zu den Simulationsrechnungen mit 10 % Hohlraumanteil (Abbildung 10.3) zu erkennen. Langfristig stellt sich dieselbe Konzentrationsverteilung ein wie bei der Simulation mit 10 % Hohlraumanteil.

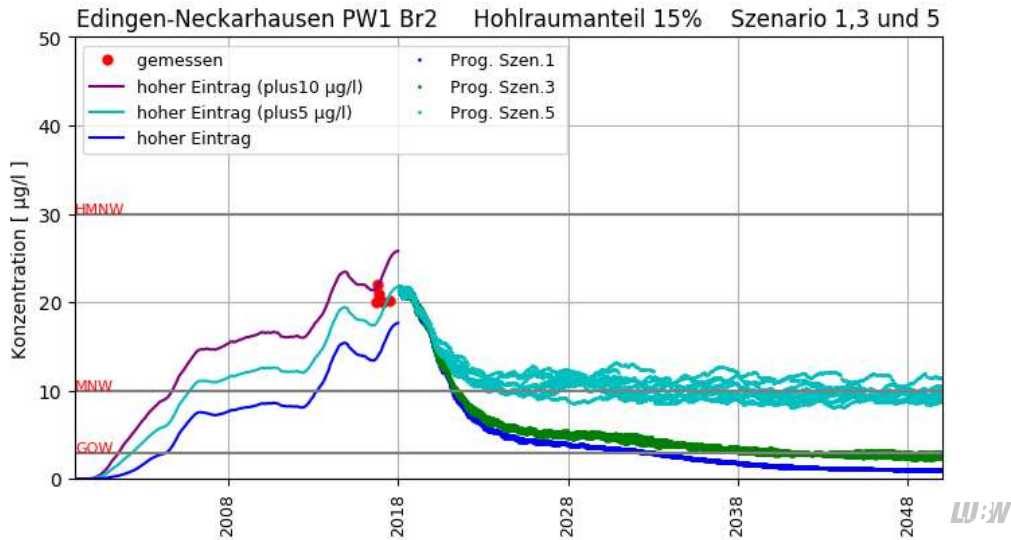


Abbildung 10.18: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050 bei einem Hohlraumanteil von 15 %

In Abbildung 10.19 ist die berechnete TFA-Ganglinie an einem Brunnen des Wasserwerks Rheinau bei einem Hohlraumanteil von 15 % dargestellt. Im Vergleich zur Simulation bei einem Hohlraumanteil von 10 % liegt das zukünftige Konzentrationsmaximum geringfügig tiefer. Dieses wird ca. 5 Jahre später erreicht und das Abklingen der TFA-Konzentration erfolgt langsamer als bei der Simulation mit Hohlraumanteil von 10 %.

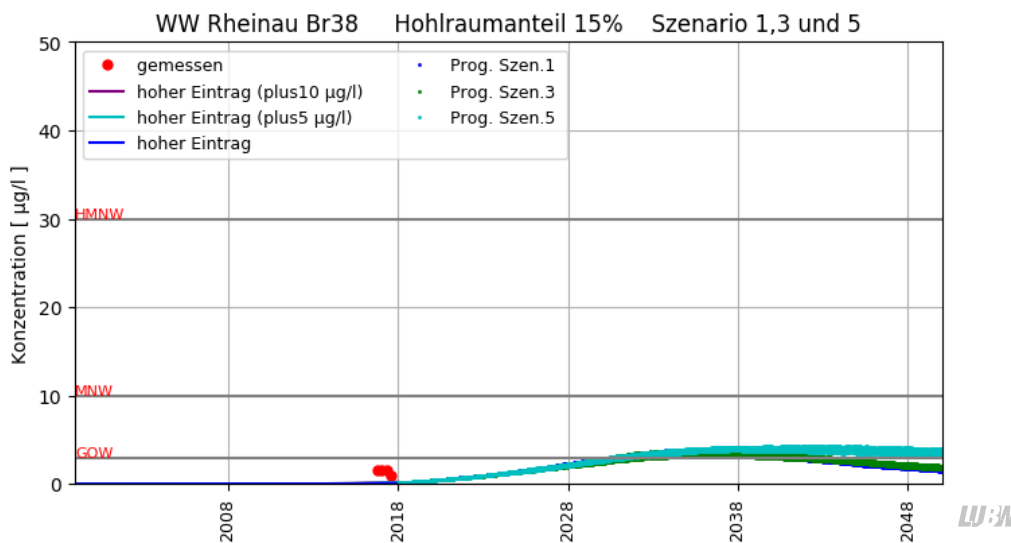


Abbildung 10.19: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050 bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Generell lässt sich für die Sensitivitätsstudie des Hohlraumanteils festhalten, dass der Hohlraumanteil hinsichtlich der Prognose auf neckarnahe Brunnen einen untergeordneten Einfluss hat. Bei neckarfernen Brunnen lassen sich Unterschiede erkennen. Auf Grund der lang anhaltenden Belastung liegen aber die Unterschiede in der Größenordnung der Prognosegenauigkeit auf diesen großen Raum- und Zeitskalen im Untersuchungsraum.

10.5 SENSITIVITÄTSBETRACHTUNG ZUR DISPERSIVITÄT

Zusätzlich zur Sensitivitätsuntersuchung für den Hohlraumanteil wurde die Längsdispersivität von 50 m auf 1 m reduziert, um den Einfluss der Dispersion auf die Prognosen zu analysieren. Da die Dispersion vor allem kurzfristige Konzentrationsspitzen beeinflusst wurde diese Sensitivitätsbetrachtung durchgeführt, um zu klären, wie weit derartige Konzentrationsspitzen im Neckar sich im Grundwasserleiter durchpausen können. Bei der verwendeten Längsdispersivität von 1 m wurde das Verhältnis zwischen Längs- und Quersdispersivität von 10:1 beibehalten. Auf Grund der Diskretisierung von 100 x 100 m ist bei einer Längsdispersivität von 1 m auch von einer merklichen numerischen Dispersion auszugehen.

Beispielhaft sind die prognostizierten Ganglinien für eine Längsdispersivität von 1 m am Brunnen 2 vom PW 1 Edingen-Neckarhausen in Abbildung 10.20 dargestellt. Verglichen mit der Simulation mit einer Längsdispersivität von 50 m sind wesentliche Unterschiede nur bei Szenario 5 zu erkennen, da bei generell höheren TFA-Konzentrationen die hydrologisch bedingten Schwankungen der TFA-Konzentration merklicher sind als bei höherer Dispersion.

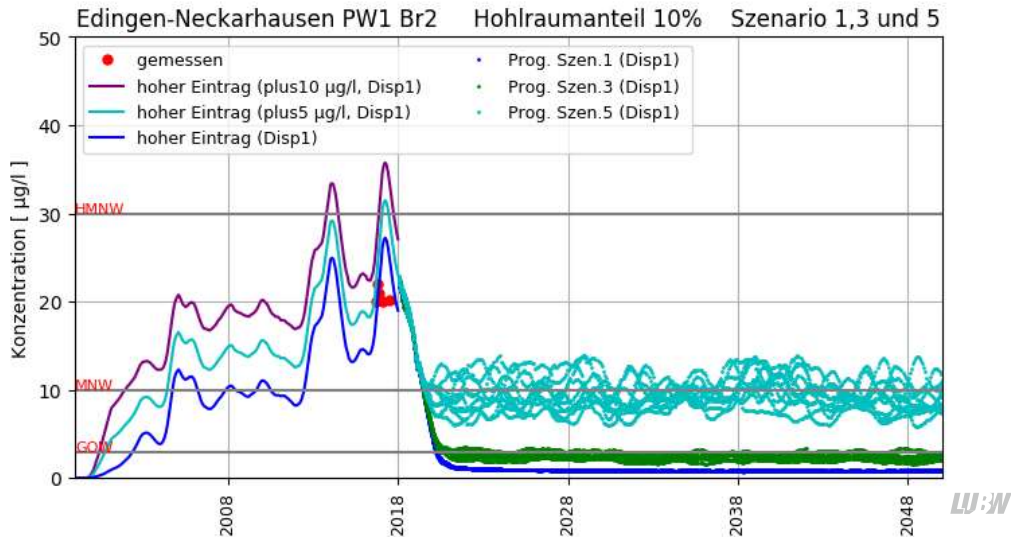


Abbildung 10.20: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050 bei einer Längsdispersivität von 1 m

In Abbildung 10.21 sind die Prognoseganglinien für Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau bei geringer Dispersion dargestellt. Hier zeigt sich deutlich, dass auch die Nachbildung der historischen TFA-Ganglinien anders ist als bei hoher Dispersion. Außerdem steigen die TFA-Konzentrationen in der Prognose etwas mehr an als bei hoher Dispersion. An diesem Brunnen führt die geringere Dispersion dazu, dass der ursprüngliche Maßnahmenwert von 10 µg/l in der Prognose überschritten wird, während bei hoher Dispersion dieser nicht erreicht wird. Der aktuelle Maßnahmenwert von 30 µg/l wird nicht erreicht.

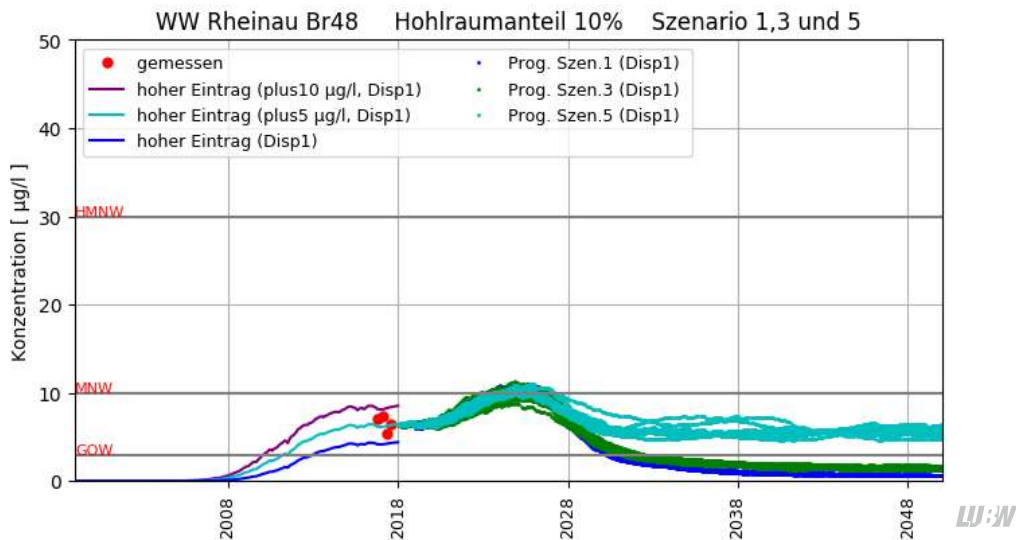


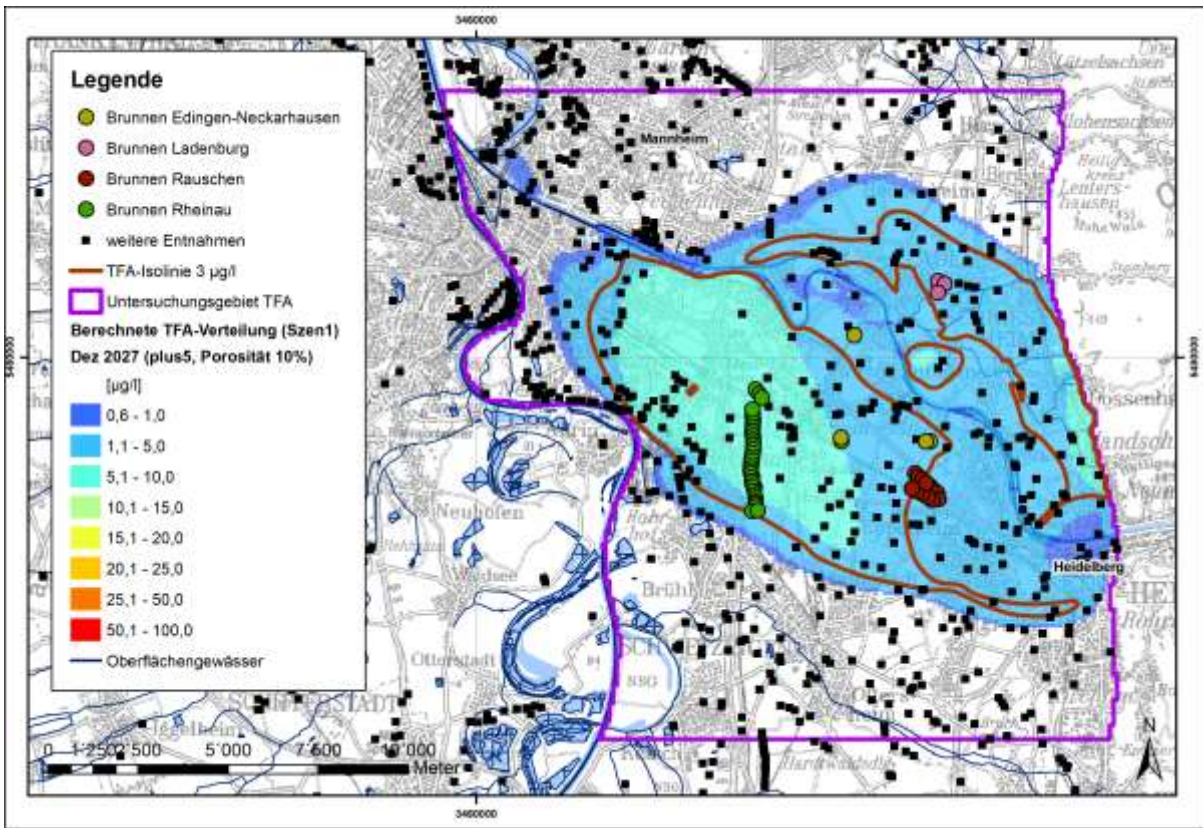
Abbildung 10.21: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050 bei einer Längsdispersivität von 1 m

10.6 TFA-VERTEILUNGEN

Mit Hilfe des Modells wurden auch flächige Verteilungen der TFA-Konzentrationen für das Jahr 2027 ausgewertet. Diese sind in Abbildung 10.22 bis Abbildung 10.26 für die Szenarien 1 bis 5 dargestellt. In allen flächigen Verteilungen ist ein deutlicher Rückgang der TFA-Konzentrationen zu erkennen. Die flächige Ausdehnung der kleinsten Konzentrationen ist in allen 5 Szenarien dieselbe. Verglichen mit den TFA-Verteilungen von 2018 sind die Ausdehnungen nach Norden und Süden etwas größer.

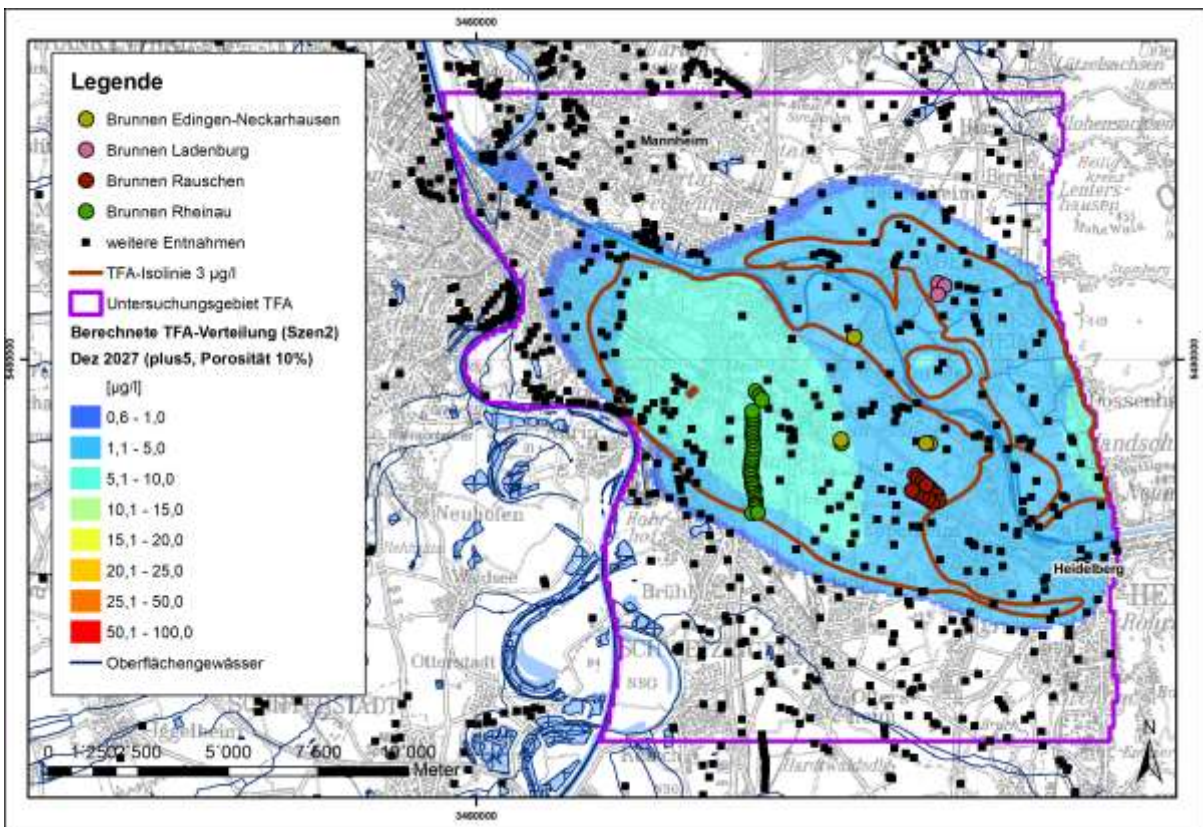
Beim Szenario 5 werden nach 10 Jahren noch maximale TFA-Konzentrationen im Grundwasser von bis zu 15 µg/l berechnet. In den Szenarien 1 bis 4 liegen die maximalen TFA-Konzentrationen flächenhaft unter 10 µg/l.

Wertet man die 3 µg/l-Isolinie der TFA-Konzentration aus, so zeigt sich, dass auch beim Szenario 1 noch große Aquiferbereiche im Jahr 2027 eine TFA-Konzentration größer als 3 µg/l aufweisen. Die neckarnahen Bereiche und ein Großteil der Brunnen des Wasserwerks Rauschen weisen Konzentrationen kleiner als 3 µg/l auf. Am Wasserwerk Rheinau sind dagegen alle Brunnen innerhalb der 3 µg/l-Isolinie und zeigen deshalb Konzentrationen größer als 3 µg/l auch bei Szenario 1. Beim Szenario 3 ist aufgrund der Neckarkonzentrationen in der Größenordnung von 3 µg/l auch die 3 µg/l-Isolinie nur im Bereich mit Grundwasserexfiltration in den Neckar und am äußeren Rand der TFA-Verteilung im Grundwasserleiter vorhanden. Die relevanten Trinkwasserbrunnen zeigen deshalb bei Szenarien 3 bis 5 Konzentrationen von 3 µg/l oder größer.



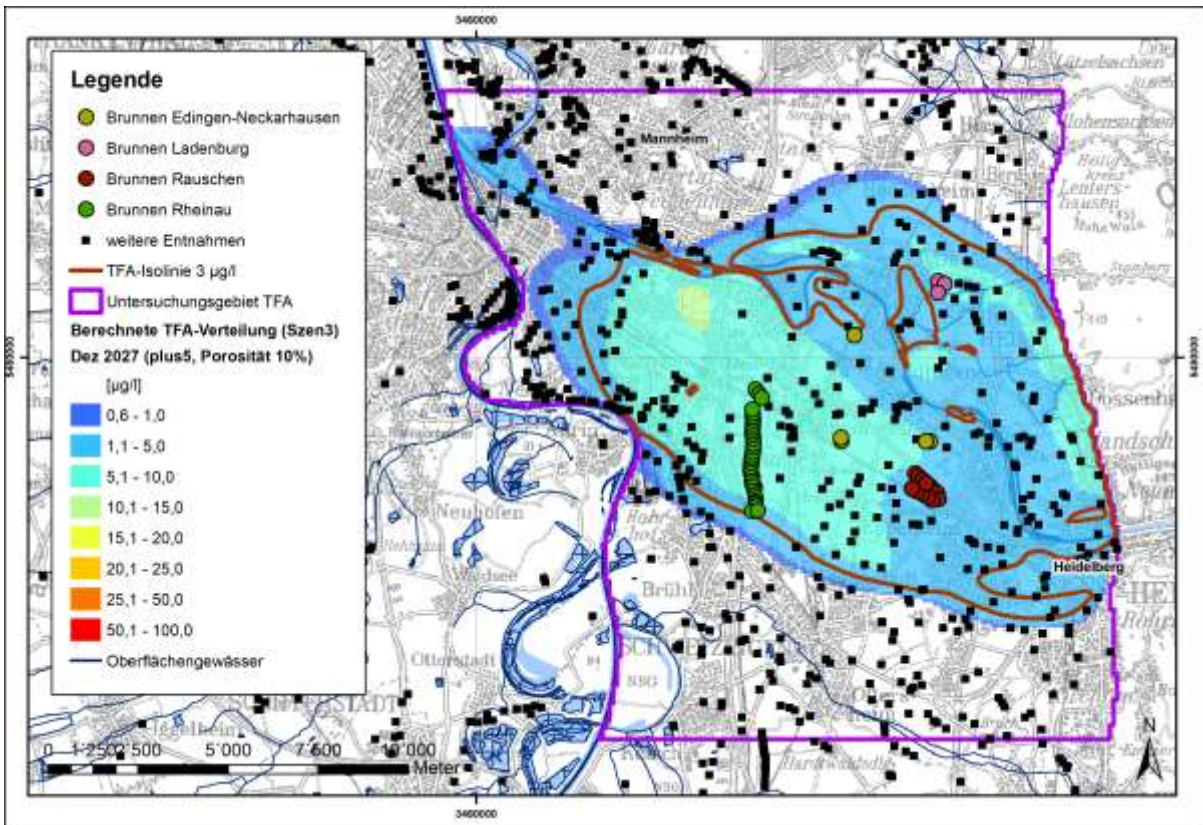
LU:W

Abbildung 10.22: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 1)



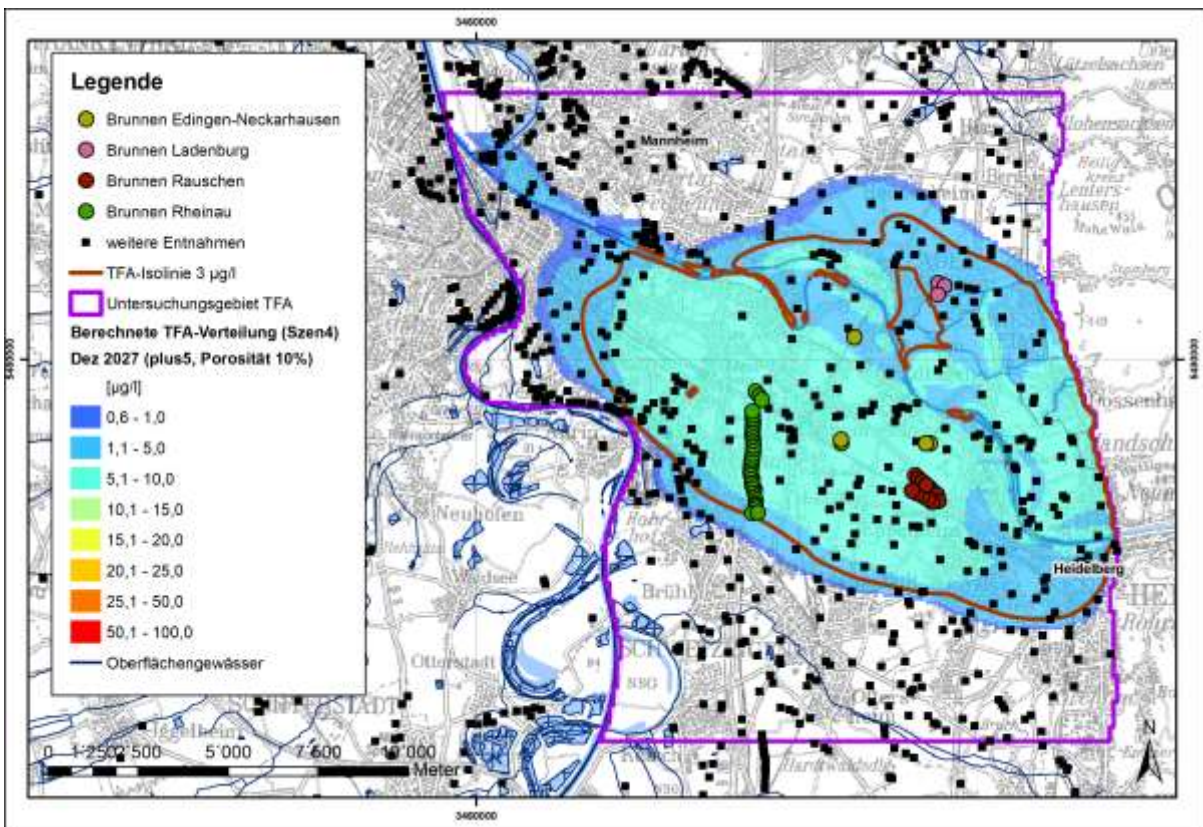
LU:W

Abbildung 10.23: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 2)



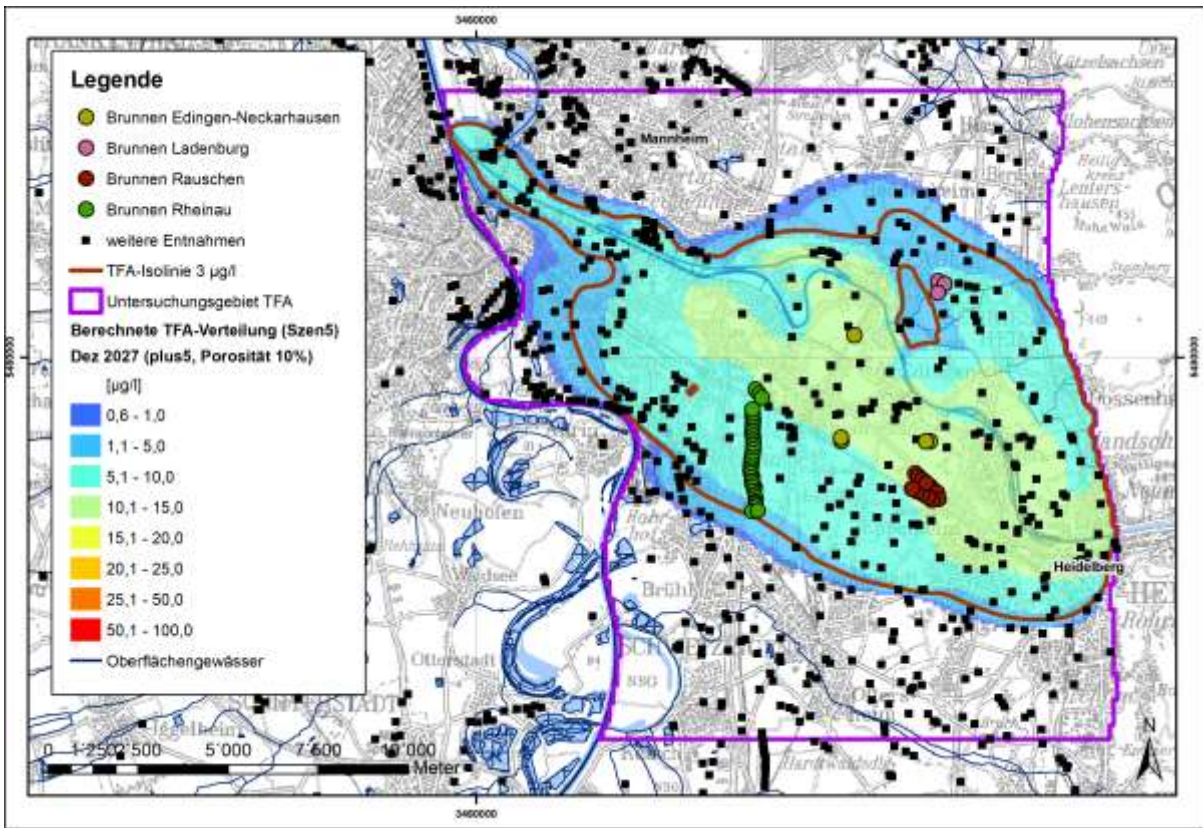
LU:W

Abbildung 10.24: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 3)



LU:W

Abbildung 10.25: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 4)



LUBW

Abbildung 10.26: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 5)

10.7 TFA-BILANZEN

Mit Hilfe des Modells wurde die Entwicklung der TFA-Massen im Grundwasserleiter ausgewertet. In Abbildung 10.27 ist exemplarisch die Entwicklung der Gesamtmasse an TFA im Grundwasserleiter jeweils für einen stochastisch erzeugten Modellauf mit gewürfelten hydrologischen Jahren dargestellt. Erfolgt der Eintrag entsprechend Szenario 5, so ist mit einer näherungsweise gleichbleibenden Entwicklung der Gesamtmasse im Aquifer zu rechnen. Beim Szenario 4 erfolgt ein Rückgang der Gesamtmasse bis 2050 auf ca. 4000 kg. Nach den Modellergebnissen ist bei Szenario 1, das keine zusätzliche Emission von TFA in den Neckar vorsieht, im Jahr 2050 noch ca. ein Drittel der aktuellen TFA-Masse im Grundwasserleiter vorhanden.

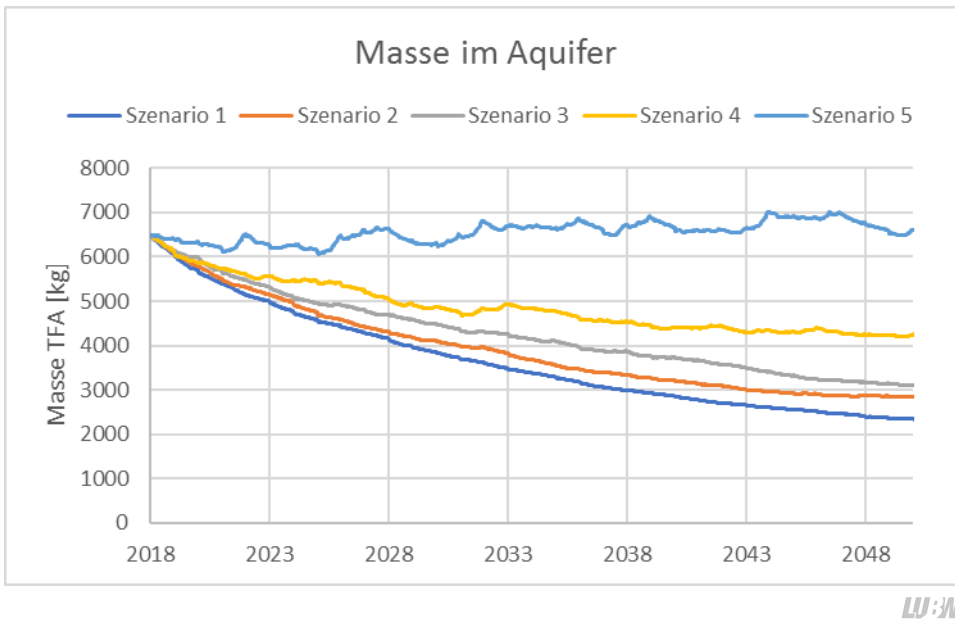


Abbildung 10.27: Entwicklung der TFA-Masse im Aquifer bis 2050 für die Szenarien 1 bis 5

11 Literatur und Quellen

DVGW (2016): Arbeitsblatt W 107 - Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V

GELHAR, L.W., WELTY, C. and REHFELDT, K.R. (1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research* 28, no. 7: 1955–1974

GUDERA, T. und MORHARD, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59 (5), 205-216; DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1.

LOGAR (2012): Länderübergreifende Organisation für Grundwasserschutz am Rhein, Programm Interreg IV Oberrhein. Region Alsace, Strasbourg, 2012.

LUBW (2017): Grundwassermodell Mittelbaden - Analyse und Prognose der PFC-Belastung im Raum Rastatt und Baden-Baden – Stand September 2017, Karlsruhe

MONIT (2006): INTERREG III A-Projekt MoNit „Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben“ – Grundwasserströmung und Nitrattransport, Karlsruhe, 2006.

SCHENKEL, C. (2017): Schichtaufbau und Verteilung der organischen Kohlenstoffgehalte in quartären Sedimenten (bis 65 m Tiefe) im Hinblick auf Retardationspotentiale organischer Schadstoffe im Bereich Ottersdorf und Steinbach/ Baden-Baden. Unveröff. Masterarbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 110 Seiten, 32 Abbildungen, 15 Tabellen; Karlsruhe.

UBA(2017): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-des-trinkwassers>

WIRSING, G. und LUZ, A. (2007): Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg), LGRB Informationen 19

12 Abbildungen und Tabellen

- Abbildung 2.1: Lage des Untersuchungsgebiets TFA im großräumigen Kontext
- Abbildung 3.1: Aus Produktionsinformationen abgeschätzte TFA-Konzentration im Neckar seit 1999
- Abbildung 4.1: Modellgebiet Karlsruhe-Worms mit ausgewählten Randbedingungen
- Abbildung 4.2: Schnittpuren der Profilschnitte durch das Untersuchungsgebiet TFA
- Abbildung 4.3: Vertikale Gliederung im Verlauf von Schnitt 1
- Abbildung 4.4: Vertikale Gliederung im Verlauf von Schnitt 2
- Abbildung 4.5: Mittlere Grundwasserneubildungsverteilung im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 4.6: Gewässernetz im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 4.7: Lage der Grundwasserentnahmestellen im Untersuchungsgebiet TFA im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 5.1: Scatterdiagramm mit gemessenen und berechneten Grundwasserständen im OGWL (Gesamtmodell)
- Abbildung 5.2: Berechnete Piezometerhöhenverteilung und Linien gleicher Grundwasserstände bei Mittelwasserverhältnissen im OGWL
- Abbildung 5.3: Lage ausgewählter Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet TFA
- Abbildung 5.4: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 527/005-0 (1385 Kfr St Ludwigshafen) im OGWL
- Abbildung 5.5: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 110/255-3 (Ma Handelshafen) im OGWL
- Abbildung 5.6: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 710/255-1 (Ma Handelshafen) im MGWL oben
- Abbildung 5.7: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 184/305-0 (WK 259o Feudenheim) im OGWL

- Abbildung 5.8: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 784/305-8 (WK 259u Feudenheim) im MGWL unten
- Abbildung 5.9: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 145/305-2 (WR 182o Seckenheim) im OGWL
- Abbildung 5.10: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 745/305-0 (WR 182u Seckenheim) im MGWL oben
- Abbildung 5.11: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 149/305-0 (NG/o Edingen) im OGWL
- Abbildung 5.12: Berechnete und gemessene Grundwasserstände an der Grundwassermessstelle 789/305-0 (NG/u Edingen) im MGWL unten
- Abbildung 5.13: Instationäre Gesamtbilanz (Zu- und Abfluss sind identisch) zwischen 1970 und 2016
- Abbildung 5.14: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung und des kapillaren Aufstiegs zwischen 1970 und 2016
- Abbildung 5.15: Zeitliche Entwicklung des Austausches zwischen Grundwasser und Gewässernetz zwischen 1970 und 2016
- Abbildung 5.16: Zeitliche Entwicklung des Austausches zwischen Rhein und Neckar mit dem Grundwasser zwischen 1970 und 2016
- Abbildung 5.17: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 5.18: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserentnahmen zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 5.19: Zeitliche Entwicklung der Neckarinfiltration zwischen 1999 und 2016 im Rhein-Neckar-Raum
- Abbildung 6.1: Gemessene Chloridkonzentration im Neckar an der Messstelle Neckargmünd mit ergänzten Daten (siehe orangene Linie)
- Abbildung 6.2: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 1 des Wasserwerks Edingen I
- Abbildung 6.3: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 2 des Wasserwerks Edingen II
- Abbildung 6.4: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 2 des Wasserwerks Seckenheim

- Abbildung 6.5: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 1 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.6: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 7 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.7: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 49 des Wasserwerks Rheinau
- Abbildung 6.8: Gemessene und berechnete Chloridkonzentrationen am Br. 58 des Wasserwerks Rheinau
- Abbildung 6.9: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen PW Neckarhausen von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.10: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am PW Neckarhausen von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.11: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 2 des PW1 von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.12: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 2 des PW1 von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.13: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 2 des PW2 von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.14: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 2 des PW2 von Edingen-Neckarhausen
- Abbildung 6.15: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.16: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.17: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.18: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen
- Abbildung 6.19: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau
- Abbildung 6.20: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau

Abbildung 6.21: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau

Abbildung 6.22: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau

Abbildung 6.23: Berechneter Uferfiltratanteil bei stoßartiger Markierung des Neckaruferfiltrats mit 100 % am Brunnen 2 von Ladenburg

Abbildung 6.24: Berechneter Uferfiltratanteil bei instationärer Strömung im Zeitraum 1970 bis 2016 und kontinuierlicher Markierung des Neckaruferfiltrats am Brunnen 2 von Ladenburg

Abbildung 7.1: TFA-Eintrag in den Grundwasserleiter durch Neckarinfiltration

Abbildung 7.2: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.3: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.4: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.5: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.6: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.7: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.8: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.9: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 10 %

Abbildung 7.10: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.11: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.12: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.13: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.14: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.15: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.16: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.17: Berechnete TFA-Ganglinie am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 7.18: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 10 %

Abbildung 7.19: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 10 %

Abbildung 7.20: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 15 %

Abbildung 7.21: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 15 %

Abbildung 7.22: Entwicklung der Gesamtmasse an TFA in den Hauptgrundwasserleitern (Porosität von 10 %)

Abbildung 8.1: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.2: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.3: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.4: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.5: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.6: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.7: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.8: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.9: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.10: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.11: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 8.12: Berechnete TFA-Ganglinien (Hohlraumanteil 15 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.1: Lage des lokal verfeinerten Modells im Untersuchungsraum

Abbildung 9.2: Isolinien der berechneten Grundwasserhöhen im großräumigen Modell und im Lokalmodell für Dezember 2016

Abbildung 9.3: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.4: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.5: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.6: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.7: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.8: Berechnete TFA-Ganglinien vom Grob- und Feinmodell (Hohlraumanteil 10 %) am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte

Abbildung 9.9: Berechnete TFA-Verteilung des Feinmodells im OGWL im Oktober 2016 mit Porosität von 10 %

Abbildung 9.10: Berechnete TFA-Verteilung des Feinmodells im OGWL im Dezember 2017 mit Porosität von 10 %

Abbildung 10.1: Zwei beispielhafte Abflussganglinien des Neckars für jeweils 12 Jahre als Basis für die Prognoserechnungen

Abbildung 10.2: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.3: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.4: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.5: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 2 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.6: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.7: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 3 des Wasserwerks Seckenheim und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.8: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.9: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 1 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.10: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.11: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 7 des Wasserwerks Rauschen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.12: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.13: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.14: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.15: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.16: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050

Abbildung 10.17: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 58 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050

Abbildung 10.18: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050 bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 10.19: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 38 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050 bei einem Hohlraumanteil von 15 %

Abbildung 10.20: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 2 des Pumpwerks 1 von Edingen-Neckarhausen und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 1, 3 und 5 bis 2050 bei einer Längsdispersivität von 1 m

Abbildung 10.21: Berechnete TFA-Ganglinien am Brunnen 48 des Wasserwerks Rheinau und gemessene TFA-Werte inkl. der berechneten TFA-Prognoseszenarien 2 und 4 bis 2050 bei einer Längsdispersivität von 1 m

Abbildung 10.22: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 1)

Abbildung 10.23: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 2)

Abbildung 10.24: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 3)

Abbildung 10.25: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 4)

Abbildung 10.26: Berechnete TFA-Verteilung im OGWL im Dezember 2027 mit Porosität von 10 % (Szenario 5)

Abbildung 10.27: Entwicklung der TFA-Masse im Aquifer bis 2050 für die Szenarien 1 bis 5

Tabelle 2.1: Abfolge der hydrogeologischen Einheiten im Untersuchungsraum und deren hydraulische Funktion

Tabelle 5.1: Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse im gesamten Modellgebiet bei mittleren Verhältnissen in m^3/s

Tabelle 5.2: Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse im Untersuchungsgebiet TFA bei mittleren Verhältnissen in m^3/s

Tabelle 6.1: Berechneter Anteil an Uferfiltrat und Laufzeiten vom Neckar zu einzelnen Trinkwassergewinnungen

Tabelle 7.1: Massenänderungen pro Jahr im Grundwasserleiter

Tabelle 7.2: TFA-Massenbilanz für Oktober 2015

Tabelle 7.3: TFA-Massenbilanz für Oktober 2016

Tabelle 7.4: TFA-Massenbilanz für Dezember 2017

Tabelle 10.1: Definition der Szenarien für die TFA-Prognoserechnungen

