



# Hydrogeologie von Hessen - Odenwald und Sprendlinger Horst

Grundwasser in Hessen, Heft 2



Grundwasser in Hessen, Heft 2

# **Hydrogeologie von Hessen - Odenwald und Sprendlinger Horst**

Wiesbaden, 2017

## Impressum

Grundwasser in Hessen, Heft 2

ISSN 2364-9828

ISBN 978-3-89026-961-0

### Hydrogeologie von Hessen – Odenwald und Sprendlinger Horst

Bearbeiter: Alexander Becht, Dr. Markus Diehl, Dr. Ronny Friedrich, Dr. Johann-Gerhard Fritsche, Mario Hergesell, Dr. Christian Hoselmann, Dr. Nicola Hug-Diegel, Dr. Dieter Kämmerer, Anne Kött, Dr. Bernd Leßmann, Constanze Lorenz-Hefner, Dr. Florian Ludwig, Ulf Marold, Dr. Heinz-Dieter Nesbor, Wolf-Peter von Pape, Dr. Werner Pöschl, Dr.-Ing. Angela Prein, Harald Rückert, Dr. Manfred W. Schneider, Renate Senner, Guido Vero

Redaktion: Dr. Dieter Kämmerer, Dr.-Ing. Angela Prein, Renate Senner

Kartographie: Michaela Hoffmann

Layout: Nadine Senkpiel

Titelbild: Burg Lindenfels mit Blick in Richtung Süden ins Schlierbachtal

Topographische

Grundlagen: ATKIS®DLM 1000, © GeoBasis-DE/Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Darstellung durch das HLNUG

Herausgeber, © und Vertrieb:  
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 69 39-111

Telefax: 0611 69 39-555

E-Mail: [vertrieb@hlnug.hessen.de](mailto:vertrieb@hlnug.hessen.de)

**[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)**

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Einleitung</b> .....	6
<b>2 Bearbeitungsgebiet</b> .....	7
2.1 Geographische Lage .....	7
2.2 Naturräumliche Gliederung und Landnutzung .....	10
2.3 Oberflächengewässer .....	12
2.4 Hydrogeologische Teilräume .....	14
<b>3 Böden</b> .....	15
3.1 Übersicht .....	15
3.2 Böden des Kristallinen Odenwaldes .....	15
3.3 Böden des Buntsandstein-Odenwaldes .....	15
3.4 Böden des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) .....	16
3.5 Bodenhydrologie .....	17
3.5.1 Bodenhydrologie des Kristallinen Odenwaldes .....	17
3.5.2 Bodenhydrologie des Buntsandstein-Odenwaldes .....	19
3.5.3 Bodenhydrologie des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) .....	19
3.5.4 Einfluss der Landnutzung auf die Bodenhydrologie .....	20
<b>4 Geologie</b> .....	21
4.1 Geologischer Überblick .....	21
4.2 Historie .....	25
4.3 Kristalliner Odenwald .....	26
4.3.1 Bergsträßer Odenwald .....	27
4.3.2 Otzberg-Zone .....	29
4.3.3 Böllsteiner Odenwald .....	29
4.4 Buntsandstein-Odenwald .....	30
4.4.1 Rotliegend .....	33
4.4.2 Zechstein .....	33
4.4.3 Buntsandstein .....	33
4.4.4 Unterer Muschelkalk .....	38
4.5 Sprendlinger Horst .....	39
4.6 Tertiär und Quartär des Oberrheingrabens .....	40
4.7 Tertiär und Quartär der Untermainebene .....	42
4.8 Strukturgeologische Verhältnisse .....	44
<b>5 Hydrogeologie</b> .....	45
5.1 Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung .....	45
5.1.1 Ermittlung der Grundwasserneubildung durch Abflussmessungen .....	46
5.1.1.1 Ermittlung der Grundwasserneubildung durch Einzelmessungen des Trockenwetterabflusses .....	46
5.1.1.2 Ermittlung des langjährig mittleren Niedrigwasserabflusses anhand langjähriger Abfluss-Messreihen ...	50
5.1.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung .....	54
5.1.2.1 Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells .....	55
5.1.2.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung .....	56
5.1.2.3 Ergebnisse .....	57
5.1.3 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse .....	65

5.2 Hydrogeologische Teilräume .....	66
5.2.1 Kristalliner Odenwald .....	66
5.2.2 Buntsandstein-Odenwald .....	66
5.2.3 Sprendlinger Horst (Rotliegend) .....	68
5.3 Bohrungen, Grundwassererschließung und Wasserförderung .....	68
5.3.1 Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach“ .....	68
5.3.2 Bohrungen .....	69
5.3.3 Grundwassererschließung und Grundwasserförderung .....	76
5.3.4 Grundwasserstände .....	76
5.4 Quellen und Schüttungsverhalten .....	79
5.4.1 Quellen .....	81
5.4.2 Grundwassermessstellen .....	81
5.5 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und Verweilzeiten .....	83
5.5.1 Grundlagendaten für die Berechnung in Lockergesteinsbereichen .....	83
5.5.2 Grundlagendaten für die Berechnung in Festgesteinsbereichen .....	83
5.5.3 Übersichtskarte der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung im Odenwald .....	84
5.6 Grundwasserbeschaffenheit .....	86
5.6.1 Methodik und Zielsetzung der hydrochemischen Grundwasserbewertung .....	86
5.6.2 Grundwässer des Buntsandstein-Odenwaldes .....	86
5.6.3 Grundwässer des Kristallinen Odenwaldes .....	88
5.6.4 Grundwässer des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) .....	91
5.6.5 Flächenhafte Betrachtung der Verteilung von Gesamthärte, Sulfat und Nitrat .....	94
5.6.6 Spurenstoffe .....	97
5.6.6.1 Spurenstoffe in Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes .....	97
5.6.6.2 Spurenstoffe in Grundwässern des Kristallinen Odenwaldes .....	98
5.6.6.3 Spurenstoffe in Grundwässern des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) .....	98
5.6.6.4 Seltene-Erden-Elemente in Grundwässern .....	99
5.7 Isotopenhydrologische Grundwasseruntersuchungen .....	99
5.7.1 Stabile Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs .....	101
5.7.2 Tritium- <sup>3</sup> He-Datierung .....	103
5.7.3 Bilanzierung des Grundwasserstroms über die Störungszone zwischen Odenwald und Hessischem Ried ...	105
<b>6 Grundwasserbewirtschaftung .....</b>	<b>111</b>
6.1 Grundwassergewinnung .....	111
6.2 Wasserschutzgebiete .....	111
6.2.1 Trinkwasserschutzgebiete .....	111
6.2.2 Heilquellenschutzgebiete .....	113
6.2.3 Wasserschutzgebiete im Bearbeitungsgebiet .....	114
6.3 Maßnahmenräume und Zustand nach EG-WRRL .....	117
6.3.1 EG-WRRL-Überwachungsmessnetze .....	117
6.3.2 Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper nach EG-WRRL .....	118
6.3.2.1 Monitoring .....	118
6.3.2.2 Zustand .....	119
6.3.2.3 Maßnahmen .....	121
6.3.3 Chemischer Zustand der Grundwasserkörper nach EG-WRRL .....	121
6.3.3.1 Monitoring .....	121
6.3.3.2 Nitrat, Ammonium und Pflanzenschutzmittelwirkstoffe (PSM) .....	122
6.3.3.3 Weitere Parameter nach Anlage 2 der Grundwasserverordnung .....	123
6.3.3.4 Maßnahmen und Maßnahmenräume mit Zielerreichung .....	124
<b>7 Zusammenfassung .....</b>	<b>125</b>
<b>8 Verwendete Literatur .....</b>	<b>129</b>
<b>9 Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>136</b>

## Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die hydrogeologische Landesaufnahme hat in Hessen eine lange Tradition. Dies zeigt sich in zahlreichen hydrogeologischen Beiträgen zu den Erläuterungen der Geologischen Karten (GK 25) von Hessen. In der Regel wurde für die Fläche des jeweiligen Kartenblatts ein umfassender hydrogeologischer Überblick zu den Themengebieten Grundwasserleiter, Grundwasserfließrichtungen, Grundwasserneubildung, Grundwasserbeschaffenheit und Wassergewinnung gegeben.

Seit Mitte der 1990er Jahre wird in Hessen blattschnittfrei hydrogeologisch kartiert. Zielsetzung ist hierbei die Erarbeitung einer umfassenden Systembeschreibung einzelner hydrogeologischer Teilräume. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass alle Informationen, die zur Beschreibung und zum Verständnis eines hydrogeologischen Teilraums notwendig sind, erhoben, dargestellt und ausgewertet werden. Die Themen Hydraulik, Grundwasserneubildung, Grundwasserbeschaffenheit und Wasserwirtschaft werden zu einer sich ergänzenden Systembeschreibung zusammengefasst, wobei vorhandene Daten aufbereitet und neue Daten erhoben werden. Grundwassermessstellen, Wassergewinnungsanlagen und Quellen werden beprobt und analysiert, um die Beschaffenheit und das Grundwasseralter zu bestimmen.

Die hydrogeologische Landesaufnahme soll der hessischen Landesregierung und ihr nachgeordneten Behörden sowie Planungs- und Ingenieurbüros, der Wasserwirtschaft und der Wissenschaft, aber auch interessierten Bürgerinnen und Bürgern ein umfassendes Grundlagenmaterial zur Hydrogeologie bieten. Sie trägt damit u. a. zu einer umweltschonenden Nutzung



der Ressource Grundwasser, zu einem optimierten Schutz des Grundwassers und damit des Trinkwassers sowie zu kostensparenden Planungen bei.

Begonnen wurde mit der Veröffentlichung der Beschreibung der Hydrogeologie des Vogelsberges. Im hier vorliegenden Band werden nun die hydrogeologischen Teilräume Odenwald und Sprendlinger Horst eingehend untersucht und umfassend dargestellt. Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen.

Prof. Dr. Thomas Schmid  
Präsident des Hessischen Landesamtes  
für Naturschutz, Umwelt und Geologie

## 1 Einleitung

In Hessen finden sich 25 hydrogeologische Teilräume, die teilweise über die Landesgrenzen hinweggehen. Die Abgrenzung basiert auf der „Übersichtskarte der hydrogeologischen Einheiten grundwasserleitender Gesteine in Hessen“ (DIEDERICH et al. 1991). Die Teilräume werden im Wesentlichen durch die geologischen Gegebenheiten definiert, wobei sie durch Gesteinsart, Hohlraumart, Verfestigung, Durchlässigkeit, geochemischer Gesteinstyp und Leitercharakter gekennzeichnet sind (FRITSCHKE et al. 2003).

Die Ziele der hydrogeologischen Landesaufnahme liegen in der Bereitstellung von Arbeits- und Planungsgrundlagen zur Bearbeitung hydrogeologischer und wasserwirtschaftlicher Fragestellungen sowie zur Lösung möglicher Interessenskonflikte, die aus konkurrierenden Flächennutzungen entstehen können. Folgende Vorhaben sind als typische Beispiele für solche Interessenskonflikte zwischen Grundwasserschutz und meist ökonomisch getriebenen Bauvorhaben anzuführen:

- Verkehrsbaumaßnahmen,
- Gebäudegründungen und Bodenversiegelungen,
- Nutzungen von Rohstoffen,
- geothermische Nutzung,
- Benutzungen von Gewässern.

Die Versorgungssicherheit der Bevölkerung mit Trinkwasser hängt wesentlich von den hydrogeologischen Kenntnissen über das jeweilige Einzugsgebiet und der daraus abgeleiteten Wasserschutzgebietsausweisung ab. Die Grundwasserbewirtschaftung kann aber auch selbst zur Gefahr für das Grundwasser, für den Naturhaushalt und für Bauwerke werden, wenn die hydrogeologischen Randbedingungen nicht ausreichend bekannt sind oder nicht angemessen beachtet werden. Dann kann es zur Überbeanspruchung des Grundwasservorkommens und einem damit verbundenen Absinken der Grundwasseroberfläche mit möglichen negativen Folgen für Naturhaushalt und Bauwerke kommen. Auch für eine erfolgreiche und nachhaltige Nutzung der Geothermie sind regionale Kenntnisse zur Geologie und Hydrogeologie eine unabdingbare Voraussetzung.

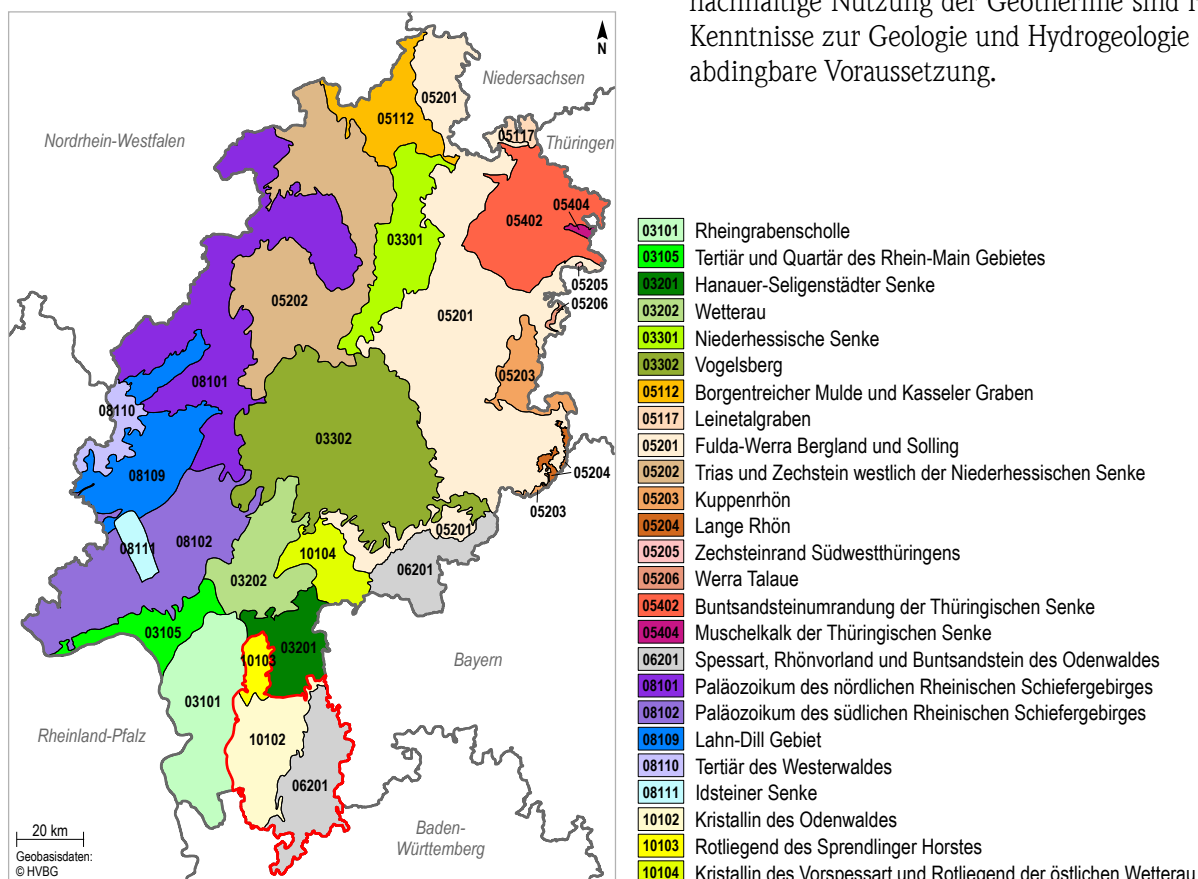


Abb. 1.1: Hydrogeologische Teilräume Hessens (FRITSCHKE et al. 2003)

## 2 Bearbeitungsgebiet

### 2.1 Geographische Lage

Der hessische Odenwald und der Sprendlinger Horst haben eine Gesamtfläche von rund 1.500 km<sup>2</sup>. Sie beinhalten den Odenwaldkreis sowie Teile der Stadt Darmstadt und der Landkreise Offenbach, Darmstadt-Dieburg, Bergstraße (Abb. 2.1).

In der Reliefkarte (Abb. 2.3) treten geologische Großstrukturen, deren nähere Beschreibung im Kapitel 4 „Geologie“ erfolgt, anhand markanter Höhenunterschiede in Erscheinung. Die westliche Grenze des Bearbeitungsgebietes wird durch den Abbruch zum Oberrheingaben gebildet (Grabenrandstörung). Angrenzend an den Oberrheingaben ist der Anstieg des Odenwaldes als steile Geländestufe zu erkennen. Bei Zwingenberg steigt das Gelände von der Rheinebene bis auf den Melibokus innerhalb von 3 km um ca. 425 Höhenmeter an. Der westliche Teil des

Bearbeitungsgebietes tritt aufgrund der Gesteinseigenschaften und der tektonischen Prägung morphologisch durch steile Täler hervor, Hangneigungen zwischen 20° und 30° sind keine Seltenheit. Ausgedehnte Hochflächen fehlen hingegen weitgehend. Die höchsten Erhebungen des hessischen Odenwaldes erreichen Höhen bis zu 605 m ü. NN. Nördlich und nordöstlich des Bearbeitungsgebietes schließt sich die sogenannte Hanau-Seligenstädter Senke an. Die Talsysteme des südöstlichen Odenwaldes sind tektonisch bedingt überwiegend in NNE-SSW-Richtung angelegt. Bei einem Vergleich der Reliefkarte mit der Abgrenzung der das Bearbeitungsgebiet untergliedernden hydrogeologischen Teilräume (Abb. 2.7) wird erkennbar, dass diese drei Teilräume auch geomorphologisch deutlich unterscheidbar sind.



**Abb. 2.1:** Lage des Bearbeitungsgebietes (rot umrandet)



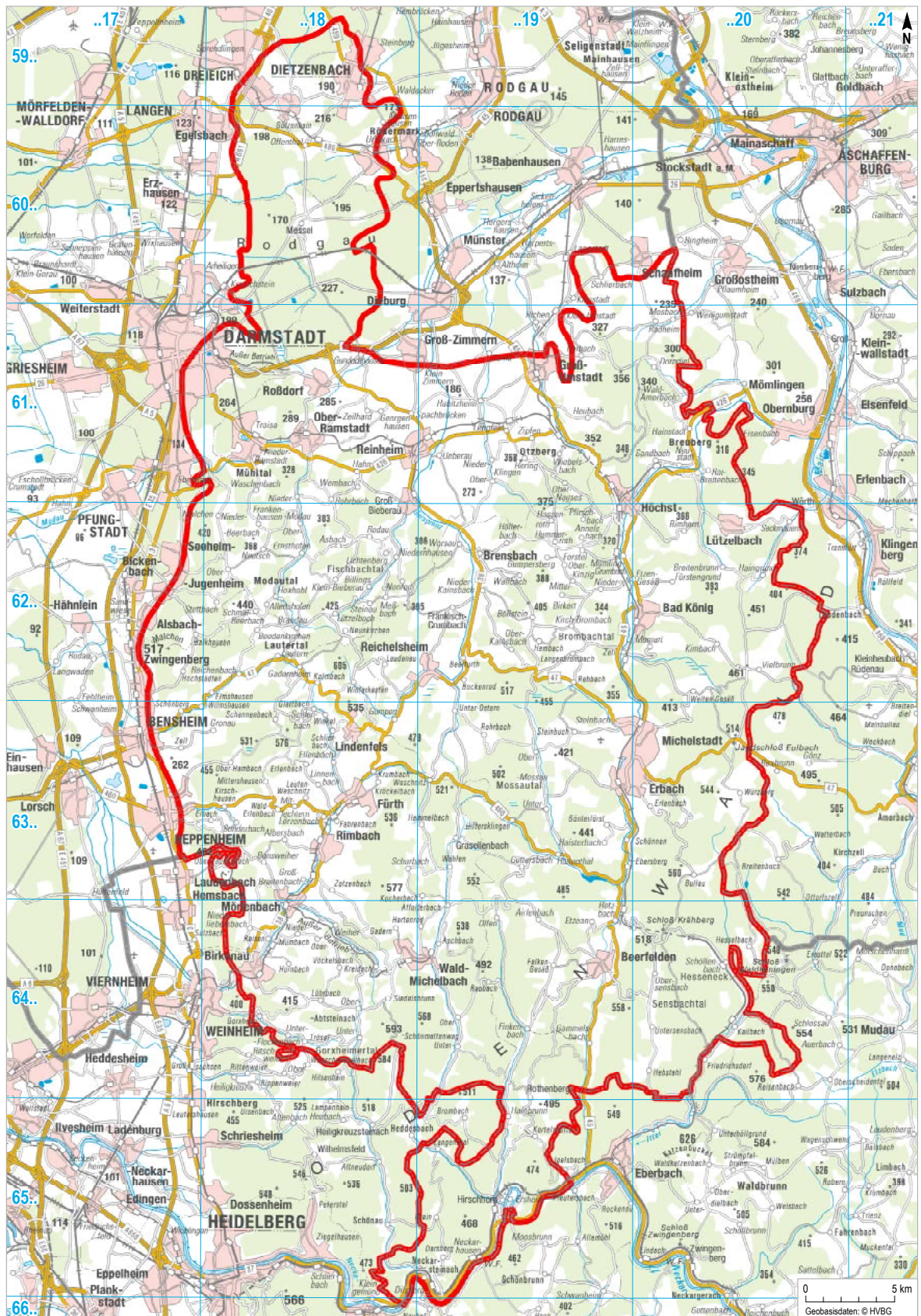


Abb. 2.2: Topographische Übersichtskarte mit Bearbeitungsgebiet (rot umrandet)

Bearbeitungsgebiet



Abb. 2.3: Reliefkarte des Bearbeitungsgebietes (rot umrandet)

## 2.2 Naturräumliche Gliederung und Landnutzung

Geographisch gehört das Bearbeitungsgebiet überwiegend zu den hessischen Mittelgebirgen. Der flächenhaft größte Teil ist dem Hessisch-Fränkischen Bergland zuzurechnen, das in einen Westteil, den Vorderen Odenwald und einen Ostteil, den Sandsteinodenwald gegliedert wird. An den Vorderen Odenwald schließen sich nach Norden das Messeler und Reinheimer Hügelland an. Im Westen zieht sich die naturräumliche Einheit Bergstraße als schmales Band entlang des Vorderen Odenwaldes. Angrenzend

an das Bearbeitungsgebiet befinden sich im Norden die Untermainebene und im Westen die Hessische Rheinebene (Abb. 2.4).

Wie anhand der Karte der Landnutzung (Abb. 2.5) erkennbar ist, werden die höher gelegenen Mittelgebirgsbereiche des östlichen und südöstlichen Odenwaldes überwiegend forstwirtschaftlich genutzt. Flächenhaft bewaldet ist auch der nördliche Teil des Bearbeitungsgebietes (Messeler Hügelland), bedingt

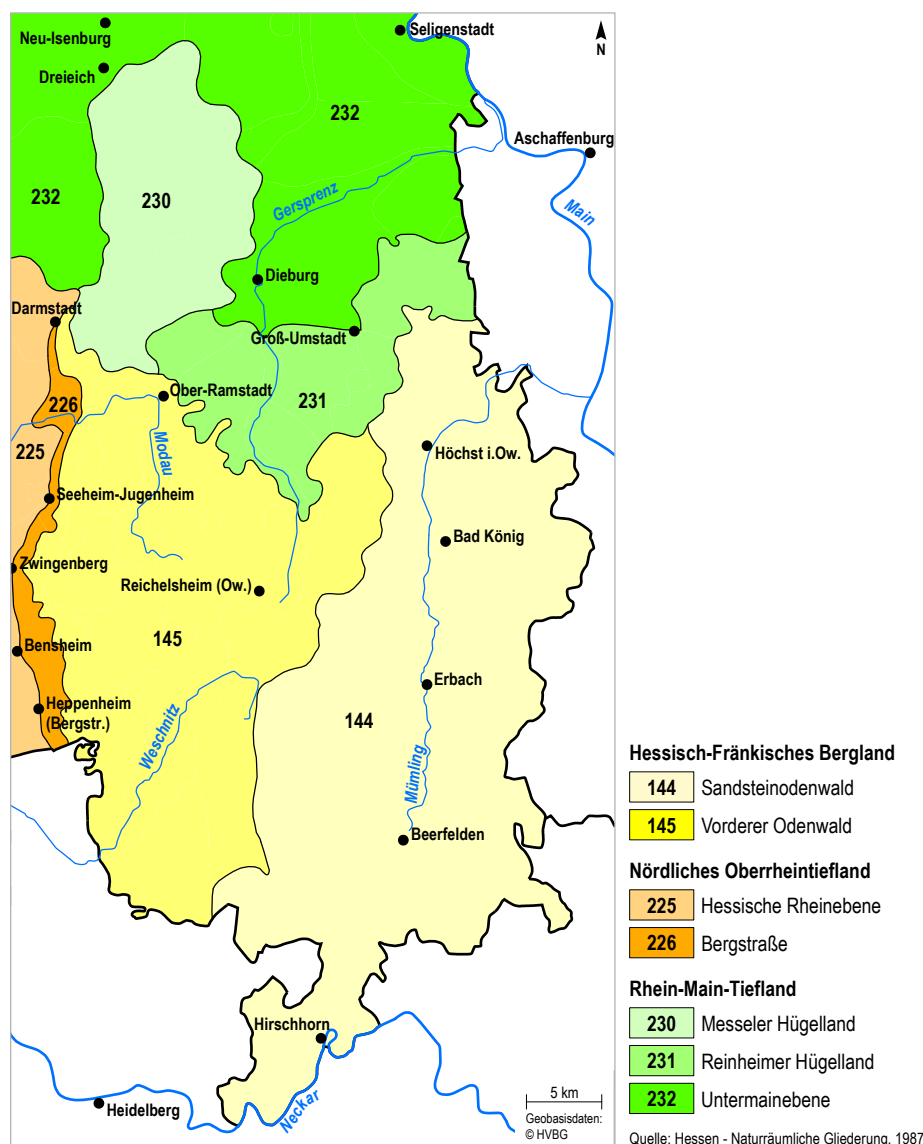


Abb. 2.4: Naturräumliche Gliederung (nach KLAUSING 1974)

durch die dort vorherrschenden tonigen und sandigen Böden, die landwirtschaftlich von geringerer Bedeutung sind. Landwirtschaftlich genutzt werden insbesondere Talauenbereiche, in denen fruchtbarere Böden verbreitet sind. Für den Vorderen Odenwald sind Lössaufwehungen an den Westrändern der Täler charakteristisch. Im Weschnitztal ist der Löss fluviatil umgelagert und kann dort bis zu 15 m mächtige Decken bilden. Die Lössvorkommen

des Buntsandstein-Odenwaldes beschränken sich meist auf die flachen Hochebenen oder auf umgelagerte und sekundär entkalkte Vorkommen der Talauen. Lösslehmablagerungen sind auch als Feinfraktion in Solifluktionsschuttdecken und Talauensedimenten zu finden. Die genannten Gebiete werden landwirtschaftlich, vornehmlich ackerbaulich genutzt. Die Westhänge des Bergsträßer Odenwaldes werden zum Teil obst- und weinbaulich genutzt.

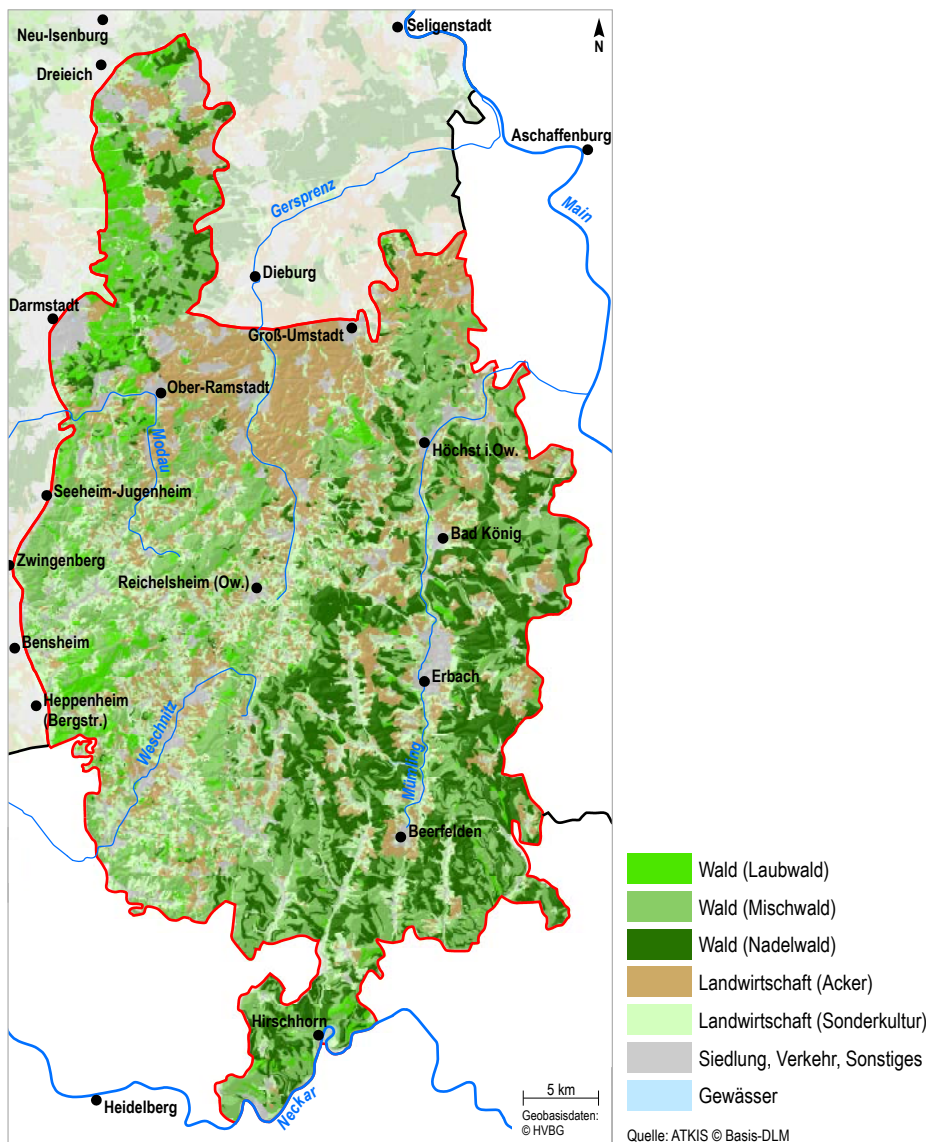


Abb. 2.5: Landnutzung im Bearbeitungsgebiet

## 2.3 Oberflächengewässer

Die Oberflächengewässer des hessischen Odenwaldes fließen entweder in den Main, in den Neckar oder direkt in den Rhein. Die Lage der Wasserscheiden zwischen Rhein, Main und Neckar ist in Abb. 2.6 markiert.

Hauptgewässersysteme des Vorderen Odenwaldes sind Gersprenz, Weschnitz und Modau. Die Weschnitz und die Modau entwässern, neben zahlreichen kleineren Bachsystemen, nach Westen in die Hessische Rheinebene. Die Gersprenz fließt nach Norden in die Untermainebene. Der Buntsandstein-Odenwald wird, abgesehen von kleineren Gewässern im nördlichen und östlichen Randbereich sowie einigen nach Süden in den Neckar entwässernden Bächen (u. a. Laxbach, Finkenbach und Teile des Itter-Einzugsgebiets), vollständig von der Mümling entwässert, die im Nordosten des Bearbeitungsgebietes in den Main mündet. Das Messeler Hügelland entwässert hauptsächlich nach

Westen über den Schwarzbach und seine Quellflüsse, nur der Ostrand des Gebietes entwässert durch Gersprenz, Rodau und Bieber in die Untermainebene.

Entsprechend des geologischen Untergrunds variiert die Gewässerdichte und die Gewässernetzstruktur des Odenwaldes. Der Vordere Odenwald ist durch die höchste Gewässerdichte (ca. 1,8 km/km<sup>2</sup>) geprägt. Es handelt es sich um ein stark verzweigtes, dendritisches Gewässernetz. Eine etwas geringere Gewässernetzdichte besteht im Messeler Hügelland (ca. 1,5 km/km<sup>2</sup>). Aufgrund besserer Versickerungsverhältnisse ist die Gewässerdichte im Buntsandstein-Odenwald mit ca. 0,8 km/km<sup>2</sup> am geringsten. Auffällig am Gewässernetz des Buntsandstein-Odenwaldes sind die verhältnismäßig geringe Verzweigung und die, vor allem im südlichen Bereich, deutliche Nord-Süd-Ausrichtung der ungefähr parallel angeordneten Haupttäler.

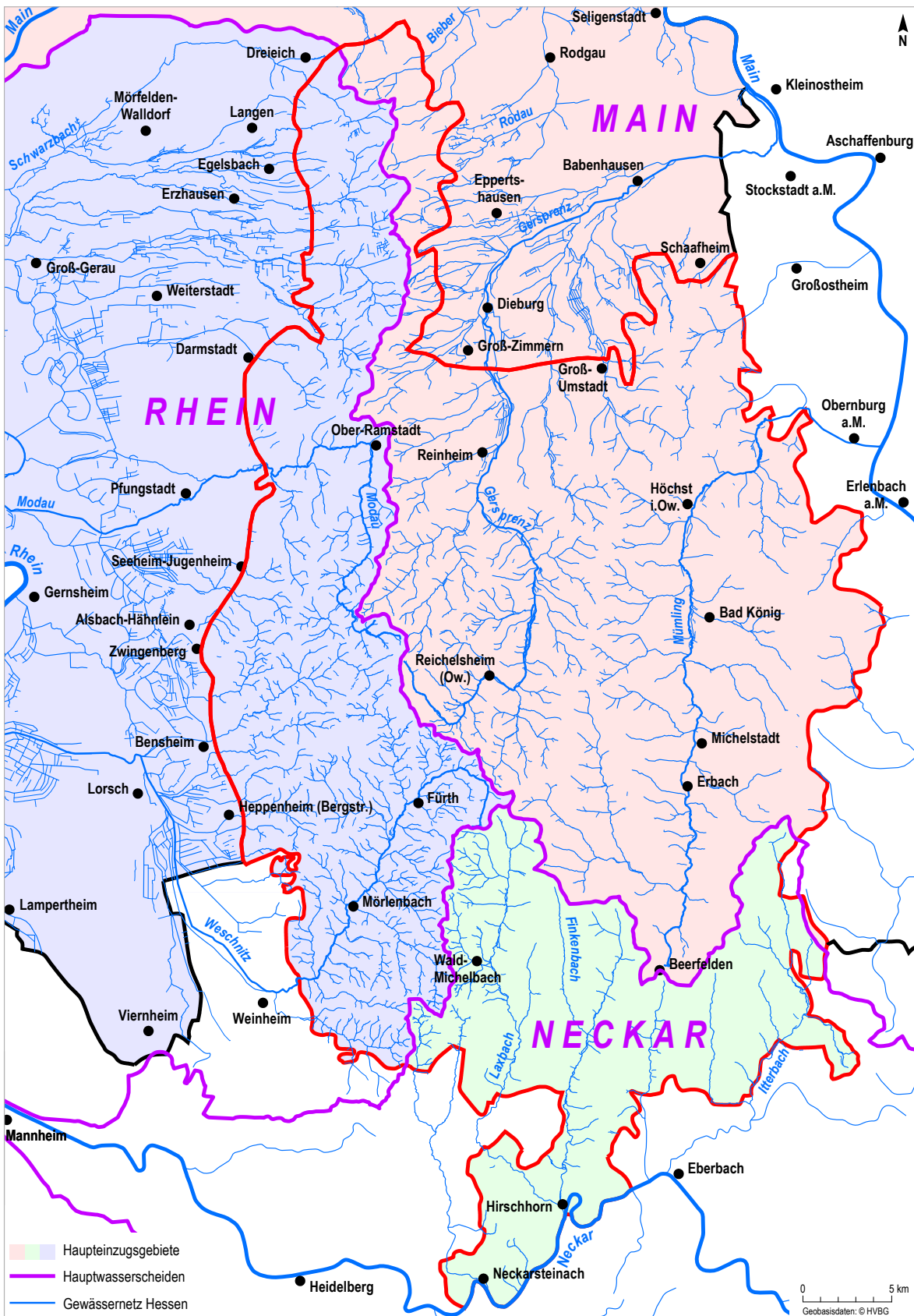


Abb. 2.6: Gewässernetz

## 2.4 Hydrogeologische Teilräume

Das Bearbeitungsgebiet umfasst drei hydrogeologische Teilräume:

- Kristallin des Odenwaldes (10102)
- Buntsandstein des Odenwaldes (06201)
- Rotliegend des Sprendlinger Horstes (10103)

Die Gebiete der angrenzenden Teilräume Rheingrabenscholle (03101) sowie Hanau-Seligenstädter Senke (03201) wurden teilweise in die Untersuchungen einbezogen.

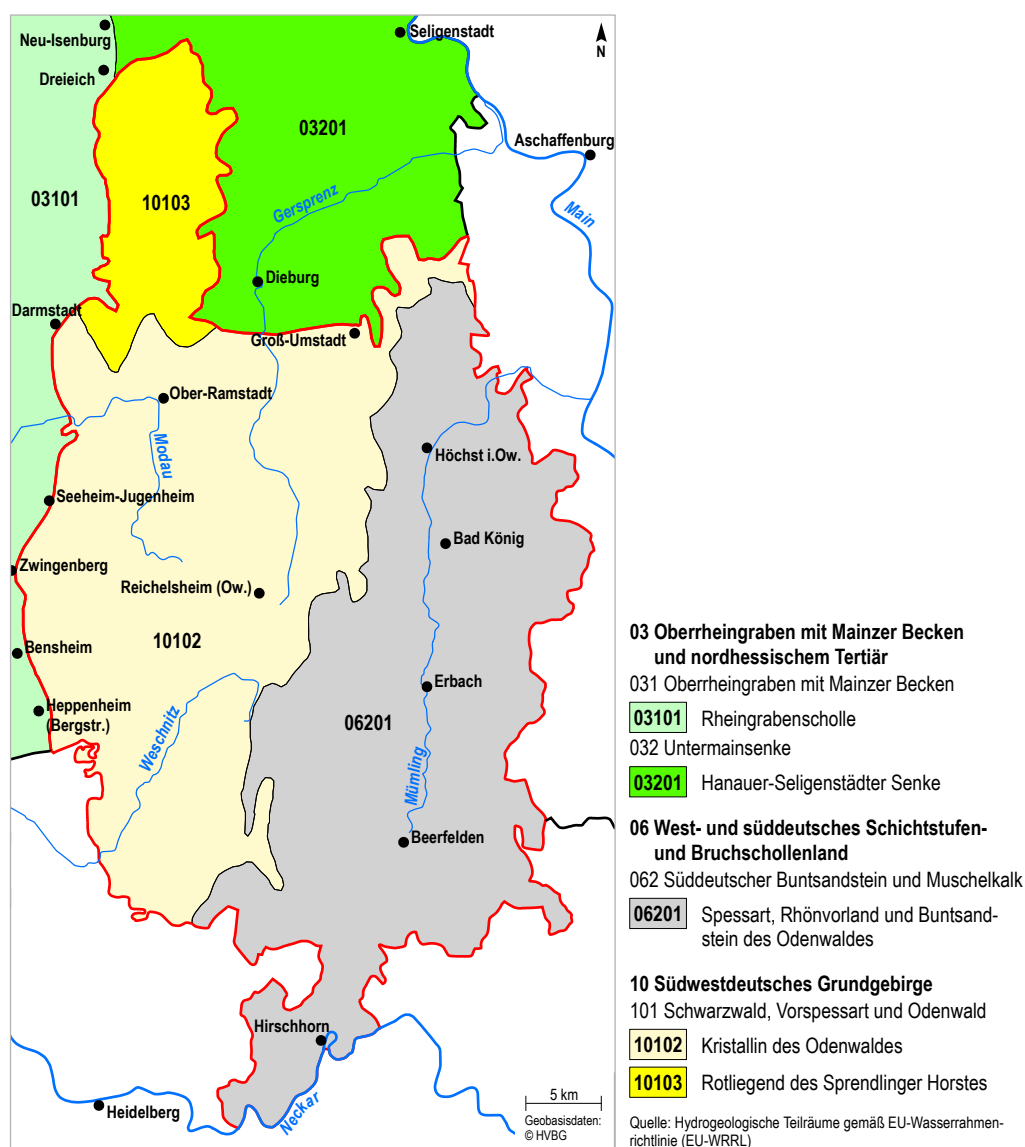


Abb. 2.7: Hydrogeologische Teilräume des Bearbeitungsgebietes (FRITSCHKE et al. 2003)

## 3 Böden

### 3.1 Übersicht

Die Böden haben einen wesentlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Beschaffenheit des Grundwassers. Insbesondere beim Grundwasserschutz, der Grundwasserhydraulik und der Grundwasserbeschaffenheit sowie für das Niederschlags-Abfluss-Verhalten eines Gebietes spielen sowohl die flächenmäßige Verteilung der Bodenart als auch die Mächtigkeit der Bodenzone eine wichtige Rolle.

In den beiden hydrogeologischen Teilräumen des Odenwaldes und im hydrogeologischen Teilraum Sprendlinger Horst unterscheiden sich die Böden aufgrund des Ausgangsgesteins und der Reliefgliederung

voneinander. Generell dominieren Braunerden und Pseudogleye in unterschiedlichen Ausprägungen. Den meisten Böden des Odenwaldes gemeinsam ist ein auf das Ausgangsgestein zurückzuführender geringer bis mittlerer Basengehalt. Eine Ausnahme bilden lediglich die auf Löss vorkommenden Pararendzinen im Westen und Norden des Kristallinen Odenwaldes. In den Talauen und an den Hangfußbereichen mit Hangwasser- oder Grundwasserbeeinflussung sind meist Gleyböden entwickelt. Rund 15 % der Fläche des Bearbeitungsgebietes ist in den Bodenkarten als Siedlungsfläche ausgewiesen.

### 3.2 Böden des Kristallinen Odenwaldes

Entsprechend der kleinräumigen Reliefgliederung des Kristallinen Odenwaldes ist die Verbreitung der Bodeneinheiten stark gegliedert. Dennoch lassen sich lageabhängig dominante Bodeneinheiten identifizieren. Über weite Gebiete des Kristallinen Odenwaldes sind Braunerden über einer Basislage aus Lehm- oder Sandgrus verbreitet, entsprechend sind als Bodenart lehmig-sandige bis tonige Schluffe charakteristisch.

Für die landwirtschaftliche Standortnutzung herrscht in diesen Braunerden ein insgesamt ausgeglichener Wasserhaushalt vor. Die zahlreichen kleinen Taleinschnitte sind in der Regel kolluvial gefüllt, sehr häufig

finden sich in den oberen Bereichen der Täler Pseudogley-Kolluvisole oder Kolluvisole aus holozänem Kolluvialschluff. Korrespondierend dazu finden sich insbesondere in den nördlichen und westlichen Randbereichen des Kristallinen Odenwaldes stark erodierte Standorte mit Pararendzinen aus mächtigen Lössablagerungen. Im Bereich nordöstlich von Reinheim sind darüber hinaus großflächig Parabraunerden aus Löss verzeichnet. Diese bieten in Verbindung mit einem hier verhältnismäßig sanft in die Hanau-Seligenstädter Senke abfallenden Relief beste Bedingungen für den Ackerbau.

### 3.3 Böden des Buntsandstein-Odenwaldes

Entsprechend der großräumigeren Reliefeinheiten bilden die Bodeneinheiten des Buntsandstein-Odenwaldes, im Vergleich zum Kristallinen Odenwald, großflächige Komplexe. Im Westen dominieren auf den Kuppen Podsole und Podsol-Braunerden mit hohen Sickerwasserraten aufgrund der geringen Feldkapazität und der regional hohen Niederschläge.

An den Hängen liegen großflächig Braunerden mit Podsol-Braunerden. Die Podsole verfügen über teilweise mächtige Ortsteinhorizonte (EMMERICH 1994). Nach Osten werden diese zunehmend durch Parabraunerden oder Braunerden-Pseudogleye oder pseudovergleyte Parabraunerden bzw. Braunerden abgelöst. Von den Podsolen abgesehen herrscht ein ausgeglichener Wasserhaushalt mit guter oder mittlerer Wasserspeicherkapazität vor.



### 3.4 Böden des Sprendlinger Horstes (Rotliegend)

Großflächig liegen im Bereich des Sprendlinger Horstes zum einen Braunerden, zum anderen Pseudogleye vor, wobei sich die Braunerden auf die Kuppenlagen und die Pseudogleye auf die Hangbereiche konzentrieren. Die Pseudogleye sind aus Fließerde über Fließschutt aus Sedimentgestein des Rotliegenden aufgebaut, welches einen hohen Tonanteil besitzt, daher besteht Potenzial zur Ausbildung von Staunässe.

Einen ausgeglichenen Wasserhaushalt hingegen weisen die sandig-lehmigen oder sandig-schluffigen Braunerden des Sprendlinger Horstes auf, jedoch ist die Wasserspeicherkapazität begrenzt. Stellenweise sind die Braunerden auch aus Flugsandfließerde gebildet, dies bringt trockene Standortbedingungen mit sich. In vereinzelt exponierten Lagen liegen flachgründige Braunerden-Rendzinen oder Braunerden mit Erosionsmerkmalen vor.

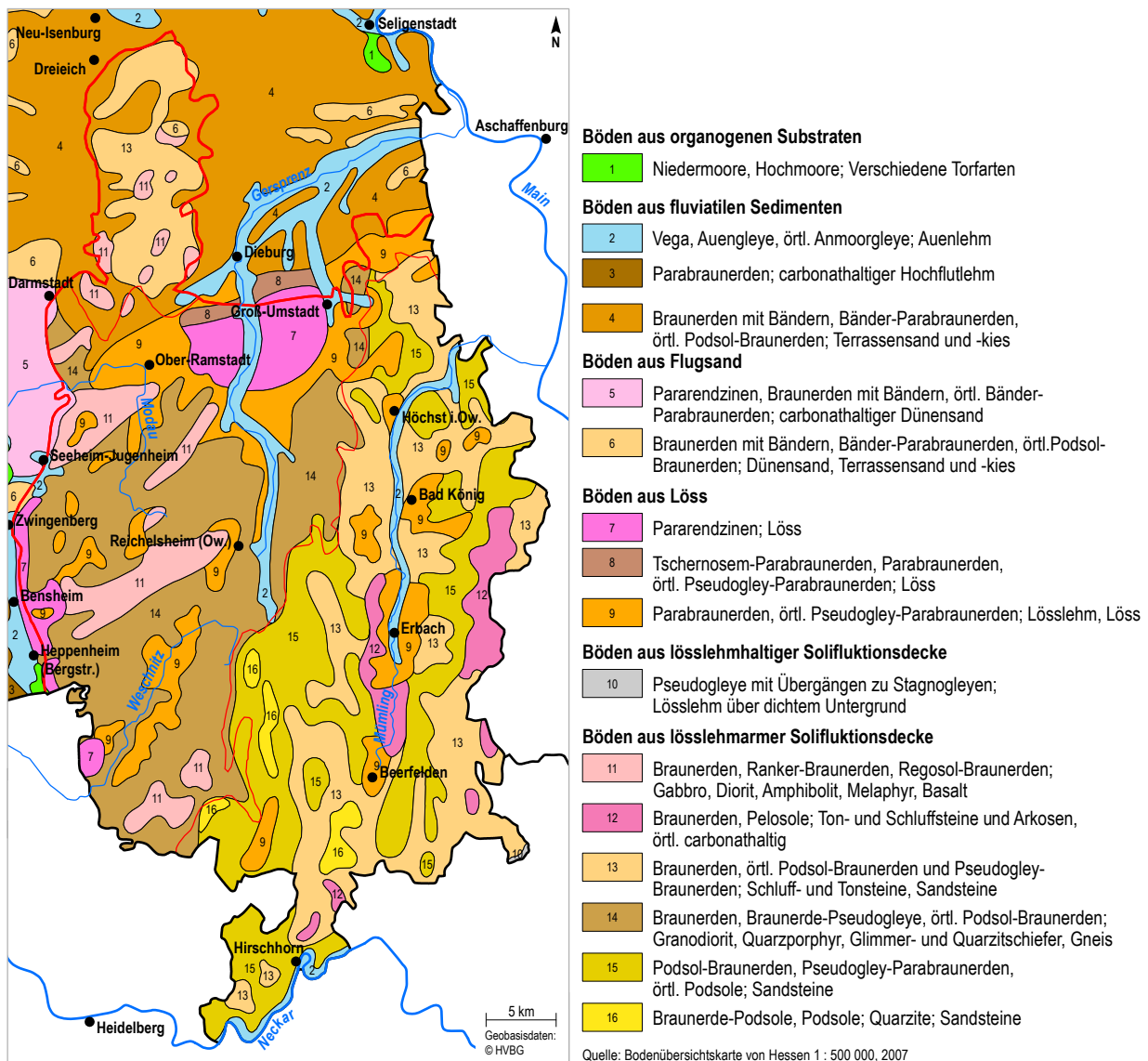


Abb. 3.1: Bodenübersichtskarte (BÜK 500)

### 3.5 Bodenhydrologie

Für die hydrologische Auswertung der Böden im Odenwald und im Sprendlinger Horst wurde das Kartenwerk „Bodenflächendaten Hessen“ im Maßstab 1 : 50 000 (BFD 50) herangezogen, welches für den Untersuchungsraum als Ganzes die bodenkundliche Datengrundlage im größtmöglichen Maßstab bietet.

Dieses Kartenwerk repräsentiert eine bodenregionale Gliederung der Landschaft. Die gesamte strukturelle Vielfalt der hessischen Böden wird auf 472 Bodeneinheiten generalisiert, differenziert nach den Landnutzungsarten Acker, Grünland und Forst. Aus diesen Gründen muss stets in Betracht gezogen werden, dass die Bodeneigenschaften – und somit auch das hydrologische Verhalten der Böden – örtlich

durchaus stark von den in der Karte beschriebenen Eigenschaften, die sich in der Regel an Leitprofilen orientieren, abweichen können. Darüber hinaus werden bislang bei der bodenkundlichen Aufnahme hydrologisch relevante Parameter (z. B. schichtbezogener  $k_f$ -Wert, Makroporosität) unzureichend erfasst, so dass für genauere Aussagen der dominanten Abflussprozesse bodenhydrologische Kartierungen notwendig sind. Als grundsätzliches Problem kommt hinzu, dass sich die Bodenkarten in der Regel auf den oberen Bodenmeter beschränken und dadurch eine Informationslücke zwischen den in der Bodenkarte vorgestellten Profilen und der geologischen Karte existieren kann.

#### 3.5.1 Bodenhydrologie des Kristallinen Odenwaldes

Im Kristallinen Odenwald ist davon auszugehen, dass die hohe Reliefenergie die Bildung schneller Abflusskomponenten ermöglicht: Die Scheitelbereiche der Hänge verfügen in der Regel über keine ausgedehnten Hochflächen, so dass Niederschlagswasser schnell den steilen Hangbereichen zugeführt wird, von wo potenziell ein kaum verzögerter Abstrom des Niederschlagswassers in die zahlreichen Tiefenlinien stattfindet. Diese weisen wiederum ein größtenteils starkes Gefälle auf, insbesondere im Bereich der Geländestufe zum Hessischen Ried. Das hohe Abflusspotenzial des Reliefs wird modifiziert durch die Retentionswirkung des Bewuchses und der Böden.

Die über weite Gebiete des Kristallinen Odenwaldes verbreiteten Braunerden (Flächenanteil ca. 51 %) unterscheiden sich in ihrer Abflussregulation: Die Braunerden aus lehmigem Sand, die an den Hängen des Kristallinen Odenwaldes dominieren, weisen eine vergleichsweise geringe nutzbare Feldkapazität auf und sind daher als Standorte mit geringem Wasserspeichervermögen anzusprechen. Die gleichzeitig hohe Wasserleitfähigkeit ermöglicht jedoch das rasche Abfließen des Wassers in tiefere Schichten. Aufgrund der starken Hangneigung ist aber davon auszugehen, dass ein hoher Anteil des Niederschlagswassers dennoch an der Oberfläche und im Bereich

der periglaziären Schuttdecken bzw. oberhalb des Festgesteins lateral als Zwischenabfluss (Interflow) abfließt.

Etwas anders verhält es sich bei den Braunerden aus tonigen Schluffen, welche u. a. großflächig im Bereich des Höhenzuges vorkommen, der von Hambach Richtung Westnordwest bis nach Reichelsheim zieht: Diese verfügen über eine mittlere nutzbare Feldkapazität, im Falle von Starkregen kann Niederschlagswasser aufgrund der vergleichsweise geringen Wasserdurchlässigkeit jedoch nur leicht verzögert in tiefere Bereiche versickern. Daher kann es bei entsprechender Reliefsituation zu subkutanen oder oberflächlichem Direktabfluss kommen.

Die in den zahlreichen Tiefenlinien und Quelltälern des Kristallinen Odenwaldes anzutreffenden Kolluvisole, Pseudogley-Kolluvisole sowie Pseudogley-Parabraunerden sind trotz ihrer kleinräumigen Verteilung und einem geringen Flächenanteil von ca. 7 % von nicht zu unterschätzender Relevanz, da sie durch ihre Lage in den Tiefenlinien die Abflusskonzentration mitbestimmen. Die in den Quelltälern des Kristallins am weitesten verbreiteten vergleyten Kolluvisole mit Gley-Kolluvisolen aus Kolluvialschluff verfügen über keine auffälligen hydromorphologischen Eigenschaften und über eine hohe nutzbare Feldkapazität.

Daher kann je nach Vorfeuchte- und Ereignisbedingungen auch zufließendes Wasser bis auf ein bestimmtes Maß zwischengespeichert werden.

Ähnliche Standortbedingungen liegen bei den Pseudogley-Kolluvisolen vor, die insbesondere in den Quell-tälern des Weststrands des Kristallins anzutreffen sind. Diese haben eine vergleichsweise etwas geringere, aber immer noch hohe nutzbare Feldkapazität und weisen keine oder nur geringe Staunässemerkmale auf. In entsprechenden Reliefpositionen ist aber nicht auszuschließen, dass die Stauschicht einen schnellen lateralen Abfluss überschüssigen Niederschlagswassers ermöglicht. Dies ist insbesondere im Bereich der zahlreichen, im Kristallinen Odenwald vorkommenden, holozän gebildeten Gerinnesysteme von Bedeutung. Diese sogenannten Runsen sind oftmals bis zum anstehenden Festgestein eingetieft (MOLDENHAUER 1993) und schneiden somit die wasserführenden Schichten des Bodens und der Schuttdecken an. Dies führt zu einer beschleunigten Entwässerung der Beitragsfläche, wovon auch Grundwasserstockwerke oberhalb des Festgesteins betroffen sein können (BAUER 1993, STOLZ 2008). Quantitative Untersuchungen zu diesem Phänomen fehlen bislang.

Korrespondierend zu den Akkumulationsgebieten der Tiefenlinien befinden sich im westlichen und nördlichen Randbereich des Kristallinen Odenwaldes erodierte Standorte mit Pararendzinen aus mächtigem Löss (Flächenanteil ca. 12 %). Trotz der

Erosion des Oberbodens ist davon auszugehen, dass in der mächtigen Lössdecke Wasser gespeichert wird und als dominanter Abflussprozess Tiefenversickerung anzusprechen ist.

Die Parabraunerden aus Sandlöss nordöstlich von Reinheim (Flächenanteil ca. 4 %) verfügen über eine hohe Wasserspeicherkapazität und zeigen keine Hinweise auf stauende Verhältnisse. Dies weist auf vorherrschende Tiefenversickerung und dem weitgehenden Ausbleiben von Direktabfluss hin, sofern nicht örtlich unangepasste Ackernutzung Verschlammungserscheinungen verursachen oder ausgeprägte Pflugsohlen laterale Abflüsse ermöglichen.

Auch wenn die am nördlichen und westlichen Rand des Kristallinen Odenwaldes vorherrschenden Pararendzinen stark erodierte Standorte aufzeigen, dürfte der als Ausgangsgestein vorliegende mächtige Löss einen ausreichenden Puffer bieten, um schnelle Abflusskomponenten an diesen Stellen zu vermeiden. Die großflächig vorkommende Erosionsleistung weist aber andererseits auf häufigen Oberflächenabfluss hin, insbesondere bei Starkregenereignissen. Die Akkumulationsgebiete dieser Pararendzinen – nämlich die Kolluvien in den Mulden und den zahlreichen kleinen Seitentälern – stellen aufgrund ihrer Tiefgründigkeit und der hohen nutzbaren Feldkapazität einen guten Wasserspeicher dar. Diese Bodenkörper sind in der Regel homogen aufgebaut und frei von Schichtungen, die eine laterale Ablenkung von Sickerwasser forcieren könnten.

## Zusammenfassung

Im Kristallinen Odenwald ist insbesondere aufgrund der Reliefsituation mit einem hohen Anteil von Direktabfluss nach Niederschlagsereignissen zu rechnen. Die meisten Böden des Kristallins sind nur bedingt in der Lage, die Auswirkungen des Reliefs durch erhöhte Zwischenspeicherung zu kompensieren. Lediglich die räumlich begrenzt verbreiteten Pararendzinen und Parabraunerden aus Löss (zusammen 16 % der Bodenflächen) sowie die Kolluvisole in

den Tiefenlinien sind potenziell in der Lage, die Auswirkungen des Reliefs nennenswert zu neutralisieren, hierbei ist jedoch die Bodennutzung (Vegetation, Wasserverbrauch) entscheidend.

### 3.5.2 Bodenhydrologie des Buntsandstein-Odenwaldes

Vor allem im östlichen Bereich des Buntsandsteins wirkt sich der erhöhte Anteil der Scheitelbereiche aus, die – anders als im Kristallinen Odenwald – auch signifikante flächige Ausbreitung aufweisen: Auf den Hochflächen besteht aufgrund der geringen Neigung das Potenzial zur Tiefenversickerung bzw. zu verzögertem Abfluss, auch wenn die Flächen grundsätzlich als Beitragsfläche der korrespondierenden Tiefenlinien wirken. Die mit einem Flächenanteil von ca. 50 % großflächig vorliegenden Braunerden des Buntsandsteins, welche mit Podsolen oder Podsol-Braunerden (ca. 8 %) vergesellschaftet sind, weisen ein geringes Wasserspeichervermögen bei insgesamt ausgeglichenem Wasserhaushalt auf. Insbesondere in Kuppenlagen liegen Podsole und Podsol-Braunerden aus lössarmem Schuttsand vor. Diese verfügen über eine sehr geringe nutzbare Feldkapazität. Eine Tiefenversickerung ist anzunehmen. Unklar sind jedoch die bodenhydrologischen Auswirkungen der von EMMERICH (1994) für die Podsole des Buntsandsteins beschriebenen mächtigen Ortsteinhorizonte. Allgemein wird – solange keine Meliorationsmaßnahmen durchgeführt wurden – davon ausgegangen, dass die Ortsteine relativ wasserundurchlässig sind. Dies könnte

bei gering geneigten Flächen nach Niederschlag Stau-nässe und in der Folge eine schnelle Austrocknung bewirken. Die Profile der Podsole und Braunerde-Podsole im Buntsandstein-Odenwald weisen jedoch keine Stau-nässemerkmale auf, so dass – begünstigt durch das sandige Substrat – von einer schnellen Ableitung des Wassers entweder durch den Ortsteinhorizont hindurch oder lateral ausgegangen werden muss.

Besonders hervorzuheben sind die auf ca. 29 % der Fläche vorkommenden Pseudogleye des Buntsandstein-Odenwaldes, welche in Hangbereichen gürtelartig um Tiefenlinien angeordnet oder als inselhafte Vorkommen auf Kuppenlagen vorzufinden sind. Diese reagieren mit Stau-nässestufen zwischen 4 und 5 sehr schnell auf Niederschlagsereignisse und verursachen einen entsprechenden Zwischenabfluss entlang der stauenden Schicht. Bei einem Anschluss an eine Tiefenlinie wirken diese Flächen somit direkt abflussbildend. Bei den Pseudogleyen in Kuppenlagen kann davon ausgegangen werden, dass der anfallende Zwischenabfluss von den umgebenden Braunerden und Podsol-Braunerden gepuffert bzw. der Tiefenversickerung zugeleitet wird.

### 3.5.3 Bodenhydrologie des Sprendlinger Horstes (Rotliegend)

Im Sprendlinger Horst ist bereits reliefbedingt ein abweichendes Niederschlags-Abflussverhalten zu erwarten. Die vergleichsweise geringen Hangneigungen unterstützen die Tiefenversickerung. Die geringe Reliefenergie hin zur Ebene des Oberrheingrabens und zur Untermainebene führt zu einem geringeren Gefälle der oberirdischen Gewässer, was mit einer vergleichsweise moderaten Reaktion auf Niederschlagsverhältnisse einhergeht. Im Verhältnis zum Odenwald dürfte dies auch die Bildung von Direktabfluss auf den mit 40 % Flächenanteil großflächig vorliegenden, stark stauenden Pseudogleyen reduzieren. Jedoch ist hier in geneigten Bereichen die Bildung von schnellen Zwischenabflusskomponenten nicht auszuschließen. Die ebenfalls großflächig verbreiteten Braunerden (Flächenanteil 46 %) weisen hingegen einen ausgeglichenen

Wasserhaushalt bei geringer Speicherkapazität auf. Dies lässt einen hohen Anteil an Tiefenversickerung vermuten. Gegen eine Tiefenversickerung in das Festgestein sprechen jedoch die geringe bis sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und die geringe effektive Klüftung der Gesteine des Sprendlinger Horstes, worauf die vergleichsweise hohe Gewässernetzdichte und die geringe Grundwasserneubildung in diesem Gebiet hinweist. Daher ist davon auszugehen, dass der Hauptwasserumsatz des Sprendlinger Horstes oberflächennah in den stauenden Schichten des Pseudogleys sowie in der Auflockerungszone über dem Festgestein des Rotliegend stattfindet, deren Eigenschaften bei entsprechender Ausdehnung und Mächtigkeit mit einem Porengrundwasserleiter vergleichbar sind.

### 3.5.4 Einfluss der Landnutzung auf die Bodenhydrologie

Der Anteil an Siedlungsflächen liegt im Bearbeitungsgebiet bei etwa 15 % und ist daher als gering zu bewerten. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Siedlungsflächen bevorzugt auf geringer geneigte Reliefpositionen, insbesondere linear in den Talauen konzentrieren. Von der Versiegelung und Kanalisierung sind somit vor allem Flächen mit potenziell vergleichsweise hohem Speichervermögen betroffen.

Die Landnutzung kann in Bezug auf die Niederschlagsspeicherung lediglich grob bewertet werden. Generell verfügt der Wald zum einen über den größten Interzeptionsspeicher, zum anderen wird hier in hohem Maße über Evapotranspiration Wasser in die Atmosphäre zurückgeleitet. Darüber hinaus wird die Bodenspeicherung durch den Eintrag von Humus und die Auflockerung des Bodenkörpers durch Bioturbation verbessert. Auf der anderen Seite befindet sich Wald insbesondere auf Flächen mit vergleichsweise ungünstigen Bodeneigenschaften, zum Beispiel auf flachgründigen oder staunassen Böden. Darüber hinaus können in Gängen von Bodentieren oder entlang von Wurzelbahnen

präferentielle Fließwege existieren, durch die unter bestimmten Bedingungen ein Direktabfluss unter Umgehung der wasserspeichernden Matrix entstehen kann. Dies verdeutlicht, dass die verbreitete Aussage, dass unter Wald die beste Abflussspeicherung stattfindet, nicht pauschal haltbar ist.

Ackerflächen finden sich hingegen nur dort, wo aufgrund mächtiger Lössauflagen ein gutes Speichervermögen vorherrscht. Hier besteht jedoch generell die Gefahr, dass diese Böden durch Erosion, Verdichtung und Verschlammung degradiert werden. Auch unter Grünland kann es durch Verdichtung und Verfilzung nutzungsbedingt zum Rückgang der Infiltrationsleistung kommen.

Für die oft nicht unerhebliche Rolle, die die Landnutzung in Bezug auf die Abflusskonzentration spielt, ist darüber hinaus insbesondere das Wegenetz und Degradationserscheinungen wie Erosionsrinnen zu betrachten. Derartige Strukturen können bei entsprechendem Anschluss an das Gewässernetz die Drainage eines Gebietes erheblich erhöhen.

## 4 Geologie

### 4.1 Geologischer Überblick

Der geologische Untergrund des Bearbeitungsgebietes setzt sich aus kristallinem Grundgebirge und sedimentärem Deckgebirge zusammen. Das Grundgebirge kann in den Bergsträsser- und den Böllsteiner Odenwald geteilt werden. Die kristallinen Gesteine werden diskordant von Sedimentgesteinen des Perms (Rotliegend und Zechstein) und der Trias (Buntsandstein) überlagert. Reste von Muschelkalk sind im

östlichen Teil des Odenwaldes im tiefsten Teil des Michelstädter Grabens zu finden. Tertiäre Sedimente, wie die Ölschiefer bei Messel im Sprendlinger Horst und tertiäre vulkanische Gesteine sind lokal an verschiedenen Orten aufgeschlossen. Eine Übersicht über die wichtigsten geologischen Einheiten ist in Abb. 4.1 dargestellt.

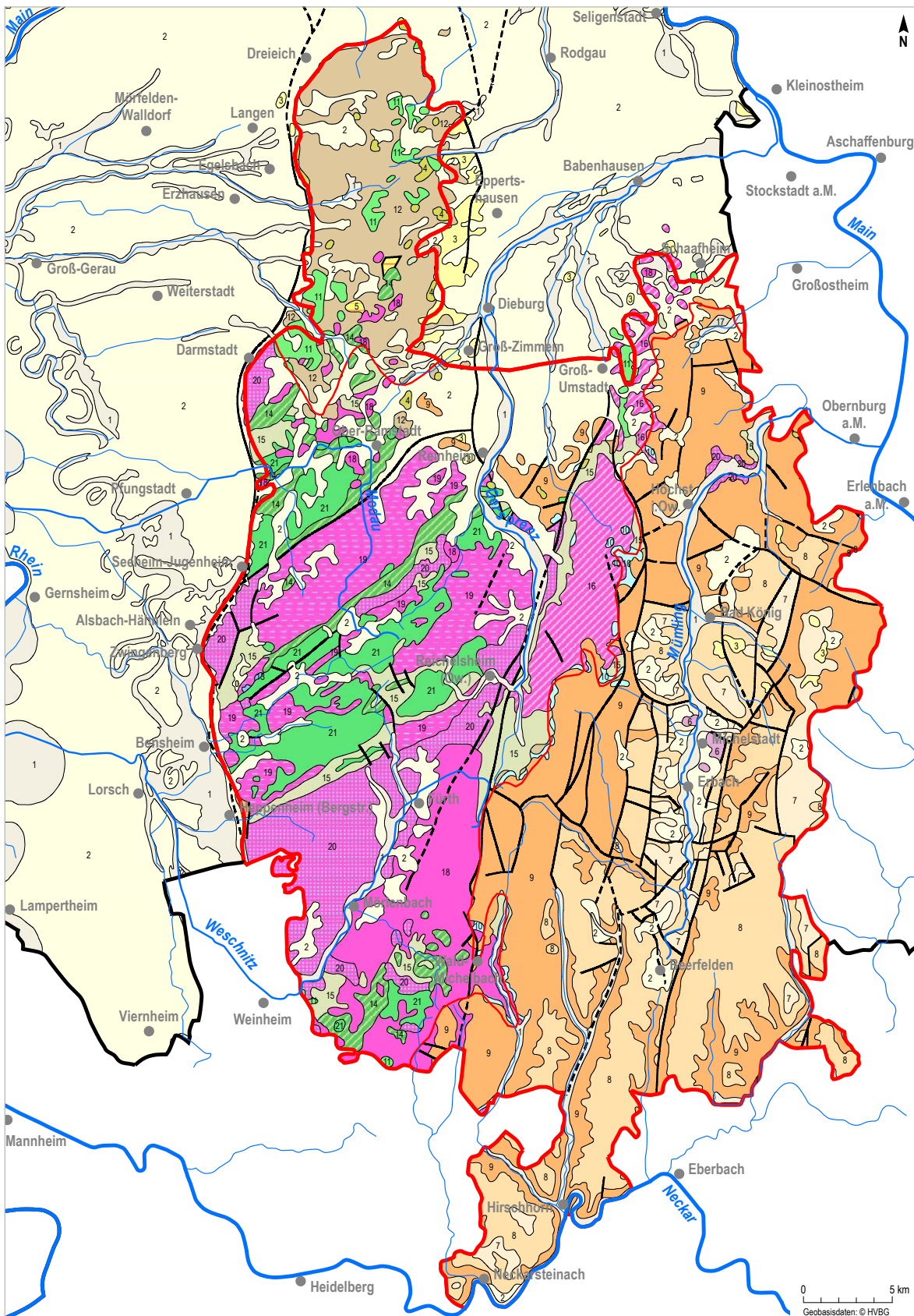
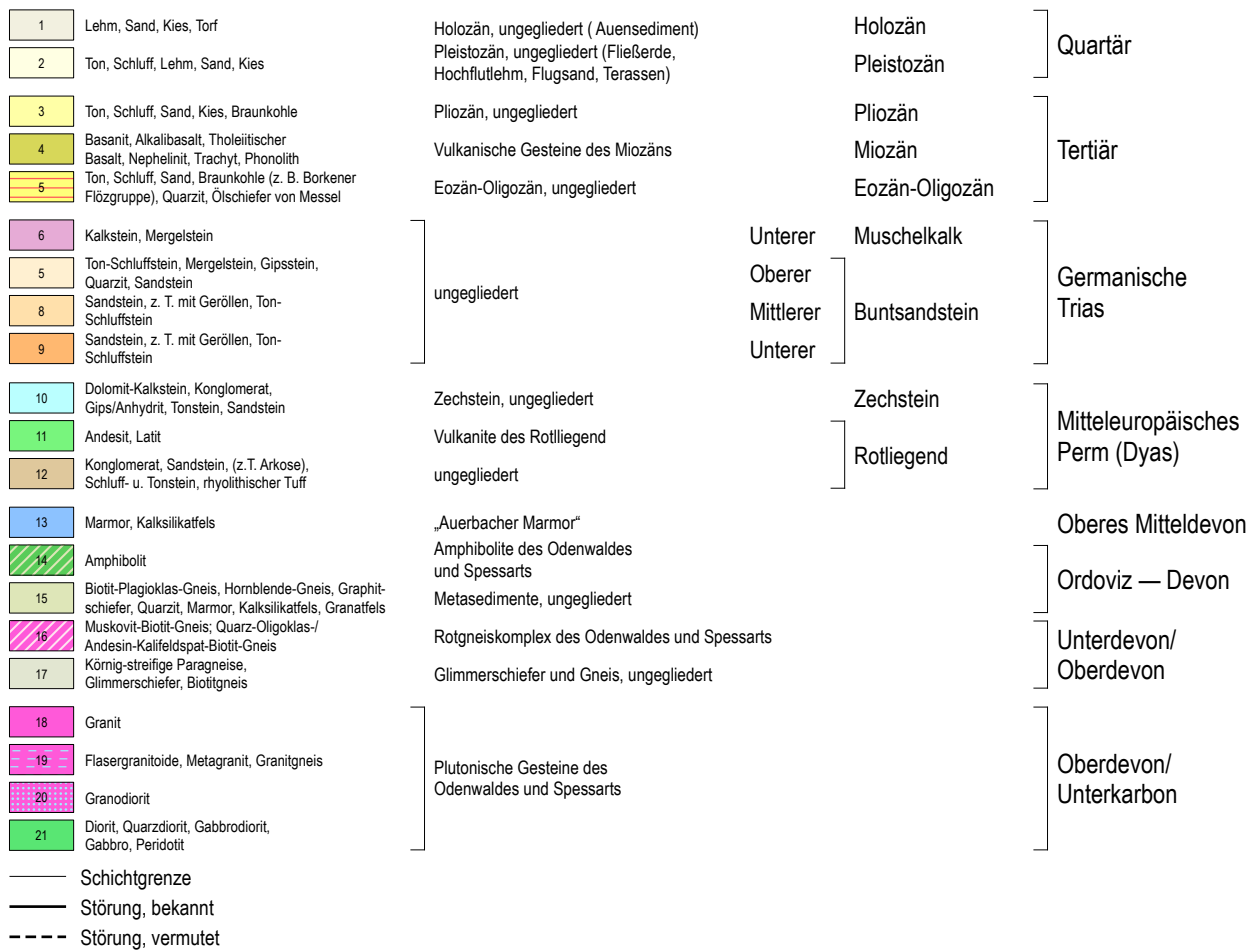


Abb. 4.1: Geologische Übersichtskarte (Ausschnitt aus der GÜK 300 (HLUG 2007))

# Geologie



Quelle: Geologische Übersichtskarte von Hessen, 5., überarbeitete, digitale Ausgabe; August 2007



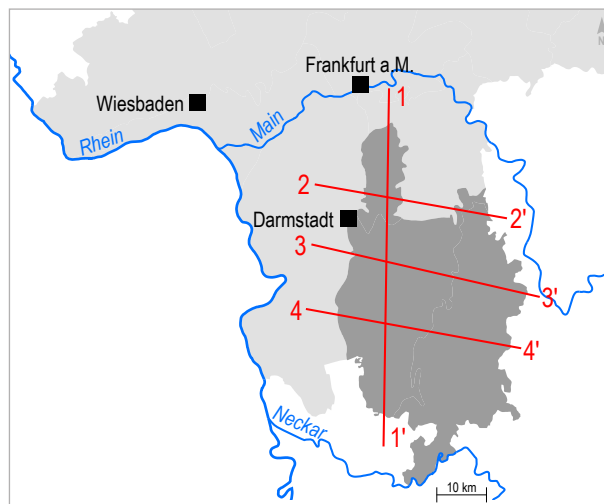
Auf Basis der qualitätsgesicherten geologischen Schichtenverzeichnisse des Bohrarchivs des HLNUG werden nachfolgend ausgewählte Schnitte durch das

Bearbeitungsgebiet gezeigt. Sie zeigen insbesondere die bekannten Hauptstörungen und die Lage der quartären Sedimente.

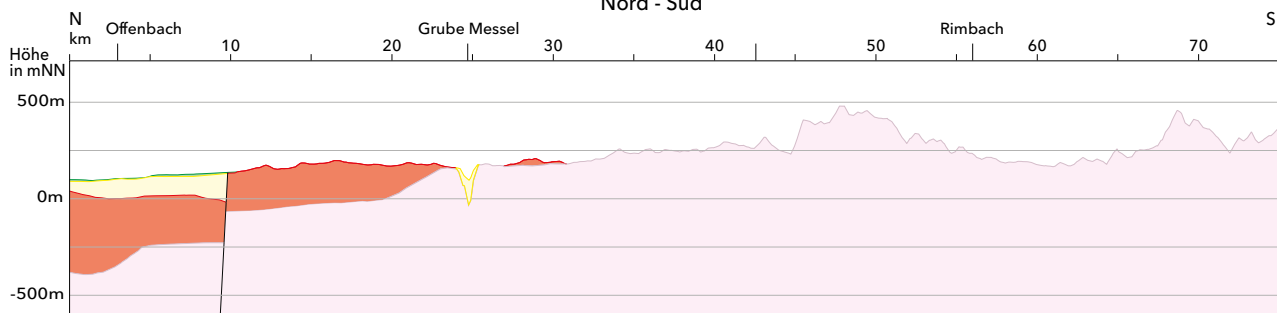
### Geologie

- Quartär
- Tertiär
- Trias (Buntsandstein)
- Perm (Zechstein)
- Perm (Rotliegend)
- Prä-Perm (hier: kristalline Gesteine)
- / Störung

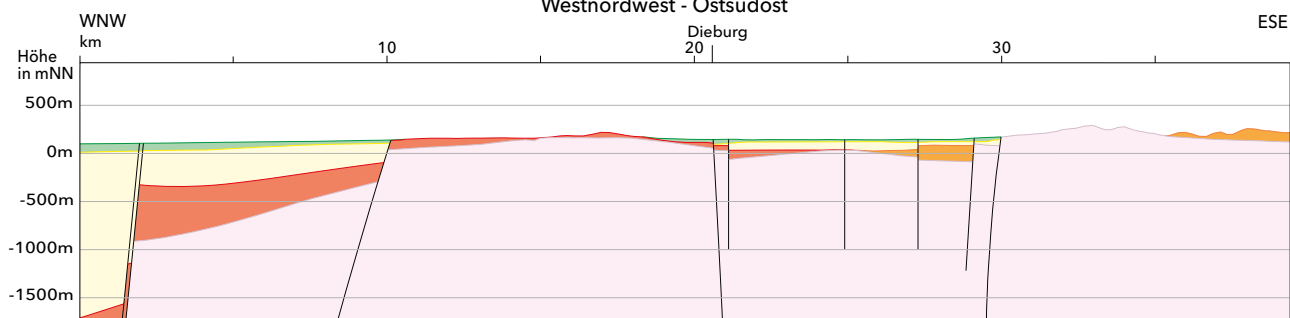
### Schnittverlauf

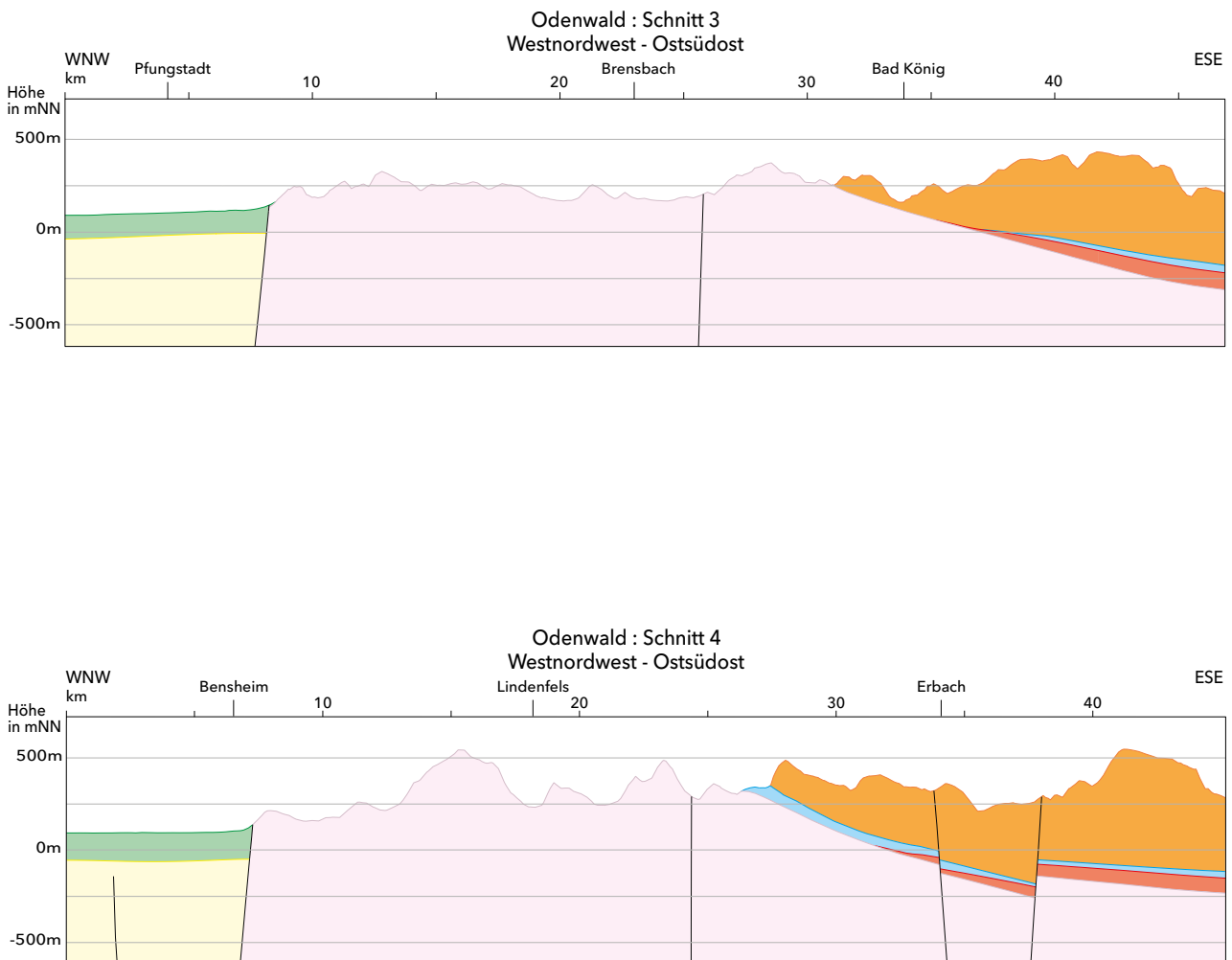


Odenwald : Schnitt 1  
Nord - Süd



Odenwald : Schnitt 2  
Westnordwest - Ostsüdost





**Abb. 4.2:** Schematische geologische Schnitte, modifiziert nach HOSELMANN & LEHNÉ (2014)

## 4.2 Historie

Mit der Zunahme des Natursteinabbaus im Odenwald und den sich damit eröffnenden Einblicken in die Gesteine rückte das Gebiet in den Mittelpunkt des geologischen Interesses. Amtliche geologische Karten im Maßstab 1 : 25 000 entstanden Ende des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts in der Großherzoglich Hessischen Geologischen Landesanstalt in Darmstadt, v. a. durch CHELIUS und KLEMM. CHELIUS erstellte die erste geologische Generalkarte im Maßstab 1 : 250 000 (CHELIUS 1899). KLEMM untersuchte insbesondere die Petrologie, Strukturgeologie und Geochemie des

Kristallinen Odenwaldes und publizierte im Jahre 1929 eine Geologische Karte im Maßstab 1 : 100 000. Der südlichste Teil des hessischen Odenwaldes wurde durch die Großherzoglich Badische Geologische Landesanstalt zu Beginn des 20. Jahrhunderts kartiert (HASEMANN 1928). Neuere Erkenntnisse zur Geologie des Kristallinen Odenwaldes erarbeiteten u. a. STEIN (2001a). Sedimentologische Arbeiten entstanden zwischen 1966 und 2003, schwerpunktmäßig in der Arbeitsgruppe von Prof. Egon BACKHAUS an der Technischen Universität Darmstadt (s. Kapitel 4.4).

### 4.3 Kristalliner Odenwald

Den westlichen Teil des Bearbeitungsgebietes bildet auf einer Fläche von rund 650 km<sup>2</sup> der Kristalline Odenwald. Begrenzt wird dieses Gebiet nach Norden durch die permischen Sedimentgesteine des Sprendlinger Horstes. Nach Nordosten grenzt das Kristallin tektonisch an die Sedimente des Tertiärs und Quartärs. Im Westen bildet eine tektonische Grenze den Übergang zwischen dem Kristallinen Odenwald und dem Tertiär des Oberrheingrabens. Östlich und südlich überlagern Sedimente des Perms und des Buntsandsteins das Kristallin. Bedingt durch das bereits vor dem Perm als ehemalige Landober-

fläche des abgetragenen Variskischen Gebirges angelegte Relief, weisen die auflagernden Sedimente des Perms eine unterschiedliche Verbreitung und schwankende Mächtigkeiten auf.

Der Kristalline Odenwald gliedert sich von West nach Ost in drei geologisch komplex gebaute Zonen:

- Bergsträßer Odenwald
- Otzberg-Zone
- Böllsteiner Odenwald



Abb. 4.3: Geologische Strukturräume (Basis: GÜK 300 (HLUG 2007))

### 4.3.1 Bergsträßer Odenwald

Den westlichsten und gleichzeitig flächenmäßig größten Teil des Kristallinen Odenwaldes bildet der Bergsträßer Odenwald. Dieses Gebiet besteht aus einem komplexen Bau magmatischer Gesteine. Umrahmt werden diese von fünf NE-SW-streichenden, steil stehenden Zügen aus metamorphen Gesteinen, den sogenannten Schieferzügen. Diese nehmen rund 10 %

der Fläche des Bergsträßer Odenwaldes ein (STEIN 2001b). Sie bestehen im Wesentlichen aus Amphiboliten, Biotit-Plagioklas-Gneisen und -Schiefern, Quarziten, Hornfelsen, Graphit-Schiefern und -Quarziten (STEIN 2001b). Untergeordnet kommen Marmore (z. B. bei Auerbach) vor.

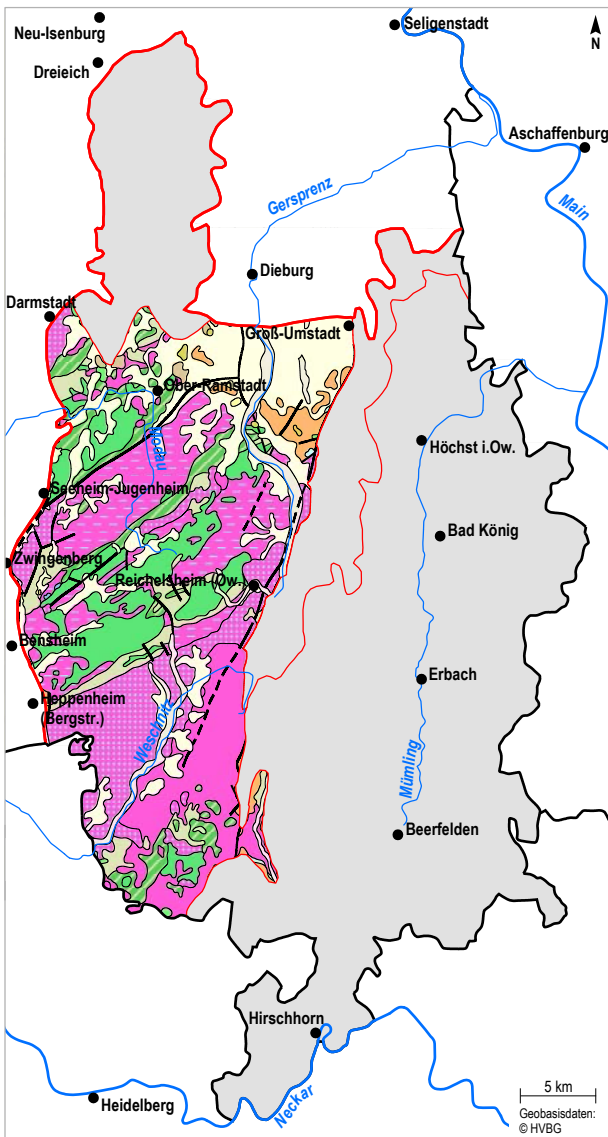


Abb. 4.4: Bergsträßer Odenwald, Ausschnitt aus der GÜK 300 (HLUG 2007), (Legende siehe Abb. 4.1)

Die Metamorphite wiederum werden von Gabbros, Gabbrodioriten, Dioriten, Granodioriten und Graniten umsäumt. Diese Plutonite bilden größere zusammenhängende Komplexe, wie das aus Gabbros und Dioriten bestehenden Frankenstein-Massiv, der Granodiorit des Weschnitz-Plutons oder der Tromm-Granit und der Heidelberger Granit (STEIN 2001a). Insgesamt können diese auch eng verzahnt miteinander oder mit regionalmetamorphen Gesteinen auftreten. Eine klare Abgrenzung der Einheiten ist wegen fehlender oder schlechter Aufschlussverhältnisse nicht immer möglich.

Der komplexe Bau und die Gesteinsbeschaffenheit des Kristallins begründen auch die Verwitterungseigenschaften der einzelnen Einheiten. Weite Teile der magmatischen Gesteine sind tiefgründig verwittert und bilden sogenannte Vergrusungszonen, die Mächtigkeiten bis zu 30 m erreichen können (MATTHESS 1964). Die grusig-sandigen Bereiche sind überwiegend in den morphologisch tieferen Zonen, insbesondere in Depressionen und Hangmulden verbreitet (MAQSUD 1984). In den höheren Zonen sind im Bereich von Hängen und Kuppen Blöcke, Blockschutt-Decken und Blockagglomerationen zu finden (MAQSUD 1984).

Bei der Verwitterung ist eine gesteinsbedingte Differenzierung zu beobachten. Unter den Metamorphiten verwittern vor allem die Quarzbiotit- und Muskovitschiefer zu sandig-schluffigem, lehmigem Substrat, das wasserstauend wirkt. Vorkommen, die mit amphibolitischen und quarzitischen Schiefen oder Kalksilikathornfelsen durchsetzt sind, bilden vornehmlich kantige oder kantengerundete Blöcke mit Durchmessern zwischen ca. 0,5–1 m. Diese Gesteinszusammensetzungen bilden meist Hang- und Kleinkuppen, Rippen oder Köpfe, da sie der Verwitterung stärker widerstehen (MAQSUD 1984).

Die Granite wie der Tromm-Granit bilden, neben anstehenden Felsen, je nach Klüftigkeit meist blockreiche Hang- und Wanderschuttdecken entlang der Oberhänge und Rücken aus, z. B. im Bereich des Tromm-Höhenzugs. Charakteristisch sind Blockbildungen, Blockhalden und -ströme, wie rund um den Melibocus entlang der Lindensteiner Kuppe bei Heppenheim.

Weniger zur Vergrusung neigen die Diorite und Gabbros sowie Leukogranodiorite und Melaquarzdiorite, wie es im Bereich des Knodener-Krehberger-Lindenfelder Höhenzugs zu beobachten ist. Ein hoher Anteil an Mafiten begünstigt die tiefgründige



**Abb. 4.5:** Kluffläche mit Verwitterungszone im Granodiorit mit Übergang vom unverwitterten Zustand bis zur typischen Wollsackverwitterung. Steinbruchwand im Steinbruch Gehrenberg, Heppenheim-Sonderbach, Fa. Röhrig Granit – © Guido Vero



**Abb. 4.6:** Felsenmeer bei Reichenbach

Verwitterung und kann stellenweise bis zu 15 m betragen. So besteht z. B. das bekannte Felsenmeer bei Reichenbach aus Diorit-Blöcken. Diese Gesteinszusammensetzungen bilden verwittert meist schluffige und lehmige Substrate.

Teilweise können die Vergrusungszonen abrupt an das Festgestein grenzen. Eine wichtige Rolle bei der Ausprägung der Vergrusungszonen spielt, neben der Gesteinszusammensetzung, das tektonisch angelegte Kluft- und Störungssystem. Im Odenwald sind das vornehmlich die variskisch und bei der Entstehung des Oberrhein-Grabens angelegten Richtungen.

### 4.3.2 Otzberg-Zone

Östlich des Bergsträßer Odenwaldes schließt sich die aus Gneisen und Amphiboliten bestehende Otzberg-Zone an. Diese Struktur streicht NNE-SSW und wird als unterkarbonische, extensionale Störungszone (Dehnungstektonik) interpretiert (SCHÄLICHE 1969, HESS & SCHMIDT 1989, KROHE 1991, KROHE 1994,

STEIN 2001a, 2001b). Den Westrand dieser Zone bildet die sogenannte Otzberg-Störung. Die Otzberg-Störung streicht NNE-SSW und gabelt nach Süden bei der Ortschaft Ober-Ostern in zwei Äste auf. Sie wird als Grenze zwischen dem Böllsteiner und Bergsträßer Odenwald angesehen (STEIN 2001a, 2001b).

### 4.3.3 Böllsteiner Odenwald

Im Osten liegt der flächenmäßig kleine und ältere Böllsteiner Odenwald. Dieser unterscheidet sich von seiner Gesteinszusammensetzung und Struktur wesentlich vom übrigen Teil des Kristallinen Odenwaldes. Das Gebiet besteht aus einem Kernbereich aus Orthogneisen, im wesentlichen Granodiorit- und Granitgneise, mit eingeschalteten Metagabbros und

Amphiboliten. Die Gneise sind z. T. stark deformiert und migmatitisch überprägt (STEIN 2001a, 2001b). Die Orthogneise werden wiederum umrahmt von noch älteren Metasedimenten (Biotitgneise und -schiefer, Hornblendegneise, Quarzite, Kalksilikatfelsen) und Amphiboliten.



**Abb. 4.7:** Gneis vom Weichberg (Böllsteiner Odenwald)

## 4.4 Buntsandstein-Odenwald

Im Gebiet des Buntsandstein-Odenwaldes sind auf einer Fläche von ca. 670 km<sup>2</sup> klastische Sedimentgesteine des Buntsandsteins verbreitet, untergeordnet auch des Zechsteins, des Rotliegend und des Muschelkalks. Die permischen Sedimentgesteine lagern dem kristallinen Grundgebirge diskordant auf, darüber liegen konkordant die Sedimentgesteine des Buntsandsteins. An den Kristallinen Odenwald grenzen die permotriassischen Sedimentgesteine teilweise mit Störungen, wie z. B. der Otzberg-Störung zwischen Kocherbach und Weschnitz. Die Gesamtmächtigkeit des Odenwälder Buntsandsteins schwankt zwischen ca. 380 und 510 m, im Mittel beträgt sie etwa 450 m (BACKHAUS & SCHWARZ 2003).

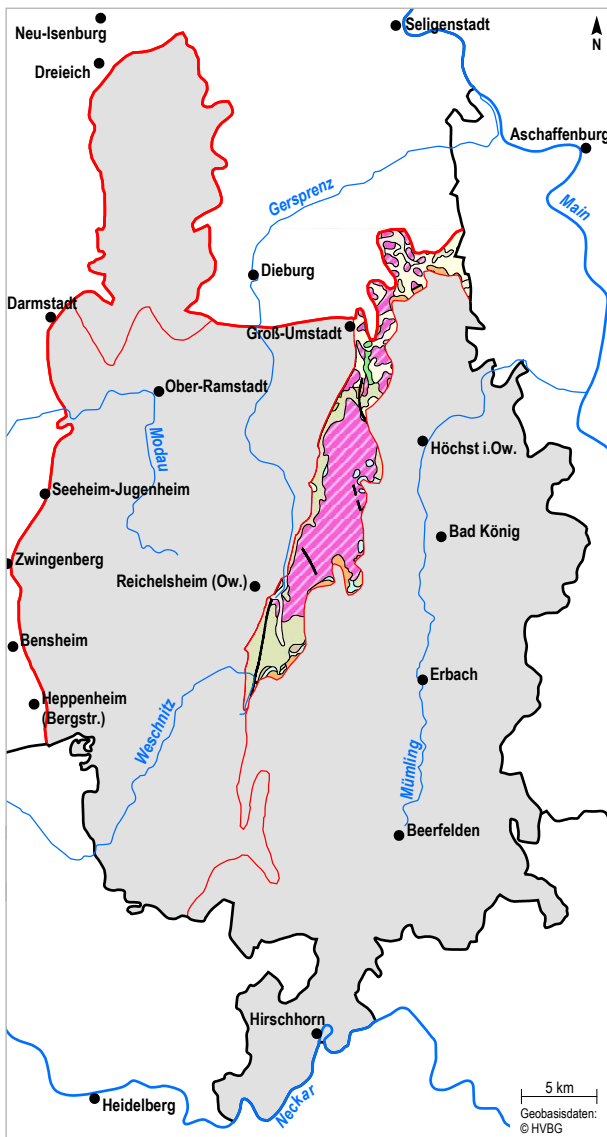
Der Buntsandstein-Odenwald ist durch Störungen in ein Schollenmosaik gegliedert, mit subparallel zum Oberrheingraben bzw. zur Otzberg-Störung verlaufenden Hauptstörungen und Querstörungen unterschiedlicher Streichrichtungen (Abb. 4.1; BECKSMANN 1970, 1975, BACKHAUS 1987).

Dabei sind in der relativ zentral gelegenen, am tiefsten abgesenkten Struktur des Michelstädter Grabens Ablagerungen des Oberen Buntsandsteins und des Muschelkalks erhalten. Die umgebenden Bereiche

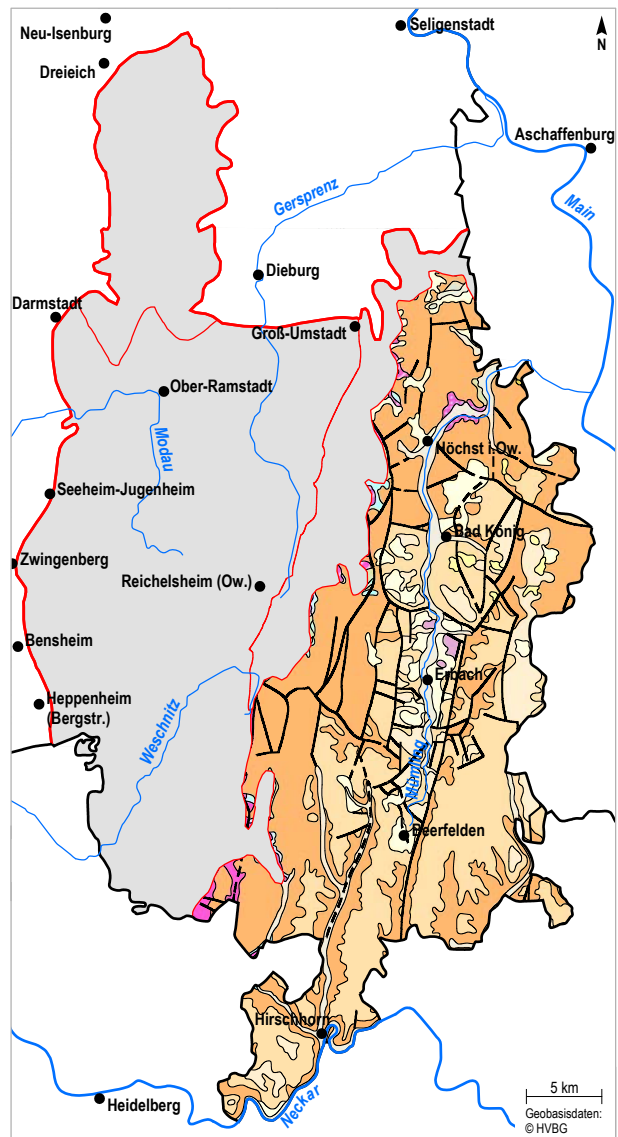
werden von Sedimentgesteinen des Mittleren Buntsandsteins dominiert. Im westlichen und nördlichen Buntsandstein-Odenwald (an der Grenze zum Kristallinen Odenwald) stehen Sedimentgesteine des Unteren Buntsandsteins an, die von einem schmalen Saum aus Karbonaten und Peliten des Zechsteins umgeben sind (s. Abb. 4.1). Bei der Interpretation der alten amtlichen Geologischen Karten ist zu beachten, dass die verwendeten Kürzel im hessischen Odenwald und im damals badischen Odenwald nicht übereinstimmen und dass die Einstufungen „Zechstein“ (z), „Unterer Buntsandstein“ (su), „Mittlerer Buntsandstein“ (sm) erheblich von der heutigen Einstufung abweichen (s. Tab. 4.1). Eine modernere sedimentologische Bearbeitung und Neugliederung, mit unterschiedlichen Versuchen der Anbindung an die Buntsandstein-Gliederung angrenzender Gebiete, erfolgte durch BACKHAUS (1960) und durch DIEDERICH (1966). Aus der Vielzahl nachfolgender Arbeiten, insbesondere der Arbeitsgruppe BACKHAUS an der TU Darmstadt, sei BACKHAUS (1975) als zusammenfassende lithostratigraphische Beschreibung des Odenwälder Buntsandsteins genannt, sowie BACKHAUS et al. (2002) und BACKHAUS & SCHWARZ (2003) als derzeit modernste Veröffentlichungen mit Zitaten vorausgegangener Arbeiten.

Heute wird, soweit möglich, die im zentralen Buntsandsteinbecken und der Hessischen Senke übliche Formationsgliederung angewendet. Es zeigt sich jedoch, dass diese nicht für alle Faziesräume gleichermaßen geeignet und oft nur schwer, nur teil- oder gar nur versuchsweise mit den historisch gewachsenen Gliederungen zu korrelieren ist. Daher wurden gebietsweise, wie etwa für den Odenwaldanteil Baden-Württembergs, bereits randfazielle Formationen von den beckenfaziellen Formationen des Buntsandsteins ausgeschieden (GEYER & GWINNER

2011, NITSCH 2013). Für den hessischen Odenwald, der aufgrund seiner paläogeographischen Lage am Südrand der Hessischen Senke mit Anschluss an die äußeren Randgebiete des Buntsandsteinbeckens eine vermittelnde Position zwischen becken- und randfaziellen Ablagerungsräumen darstellt, steht eine diesbezügliche Überarbeitung noch aus. Die resultierenden Korrelationschwierigkeiten zwischen der aktuellen stratigraphischen Gliederung des Hessischen Buntsandstein-Odenwaldes sowohl mit als auch zwischen den historischen Gliederungen selbst sind in Tab. 4.1 dargestellt.



**Abb. 4.8:** Böllsteiner Odenwald, Ausschnitt aus der GÜK 300 (HLUG 2007), (Legende siehe Abb. 4.1)



**Abb. 4.9:** Buntsandstein Odenwald, Ausschnitt aus der GÜK 300 (HLUG 2007), (Legende siehe Abb. 4.1)



**Tab. 4.1:** Historische und aktuelle Gliederungen des Zechsteins und Buntsandsteins im Odenwald

alte badische GK 25 (Bl. 6519 Eberbach, HASEMANN 1928)	alte hessische GK 25 (z. B. Bl. 6319 Erbach und 6320 Michelstadt, KLEMM 1928, Bl. 6419 Beerfelden, KLEMM 1900)	BACKHAUS 1975 (stratigraphische Korrelation der Rohrbrunn- und Geiersberg- Fm. modifiziert, siehe Text)	aktuelle Odenwald- Gliederung (z. T. vorläufig) (modifiziert nach BACKHAUS et al. 2002, BACKHAUS & SCHWARZ 2003, HUG & VERO 2008)	Untergruppe	Gruppe	Hauptgruppe
(Myophorienschichten) <b>so2 Röttone</b> (Epfenbacher Sst.)	<b>so2 Schieferletten des Röt</b>	Obere Röt-Fm.  Röttone	(Myophorienschichten) <b>Obere Röttonsteine</b> (Epfenbacher Sst.)	Oberer Buntsandstein	Buntsandstein	TRIAS
χ Chirotheriensst.	<b>so1 Plattensandsteine / Zwischenschichten</b>	Rötquarzit	Rötquarzit (VZ)			
Oberer Dolomithorizont		Obere Röt-Fm. Oberer Dolomithorizont	(VZ / Ob. Dol.hz.) <b>Untere Röttonst.</b>			
<b>so1 Plattensandsteine / Zwischenschichten</b>		Untere Röt-Fm. Plattensandstein	Röt-Fm. soR Oberer Plattensandstein Unterer (Chirother.schiefer)			
Karneolschichten	Karneolbank	Karneol-Dolomit-Hz.	Karneol-Dolomit-Horizont	Mittlerer Buntsandstein		
geröllfreier Sst.	Basissandsteine	Fels- sandstein	Fels-Sst. <b>smHF**</b>	Mittlerer Buntsandstein		
<b>sm2 Oberer Hauptbuntsandstein</b>	<b>sm5 Hauptgeröllhorizont</b>	Solling-Fm.* Solling- GrobSchüttung	Solling-Fm. <b>smS</b> Solling-GrobSchütt.			
<b>sm2 Oberer Hauptbuntsandstein</b>	<b>sm4 Grobkörnige kieselige Sandsteine</b>	Geiersberg- Fm. Obere ----- Untere	Hardeggen-Fm. <b>smH</b>			
		Rohrbrunn-Formation	Detfurth-Fm. <b>smD</b>	Unterer Buntsandstein		
			Volprieausen-Fm. <b>smV</b>			
<b>sm1 Unterer Hauptbunt- sandstein / Pseudo- morphosenssandstein</b>	<b>sm3 Oberer Pseudomorphosenst. / Feinkörniger Sst. mit Lettenbänken</b>	Miltenberg-Formation	Miltenberg- Fm. <b>suM</b>	Unterer Buntsandstein		
	<b>sm2 Unterer Pseudomorphosenst.</b>		Miltenberg- Wechselfolge <b>suMst</b>			
<b>c1 Unterer oder Eck'scher Geröllhorizont</b>	<b>sm1 Unterer Geröllhorizont / Eck's Konglomerat</b>	Eck'scher Geröllsandstein	Eck'scher Geröllsandstein <b>suE</b>	Zechstein		
<b>su2 Bau- und Tigersandsteine</b>	<b>su2 Tigersandstein</b>	Heigenbrückener Sst. („Ob. Tigerst.“)	Heigenbrücken-Sandstein <b>suH</b>			
<b>su1 Bröckelschiefer</b>	<b>su1 Schieferletten</b>	Bröckel- schiefer („Unt. Tigerst.“)	Langenthal-Fm. <b>zLa</b>	Zechstein		
<b>z Zechsteindolomit</b>	<b>z Zechstein / Zechsteindolomit</b>	(Zechstein)	Zechstein- dolomit-Fm. <b>zD</b>			
Rotliegendes	Rotliegendes	Basalbrekzie	Z.-ton <b>zDt</b> Z.-dolomit <b>zDd</b>	Zechstein	PERM	
			Rotliegend			Rotl.

(Fm.: Formation, VZ: Violette Zone; Sst.: Sandstein, Hz.: Horizont, ( ) lokal vorkommend)

\*) Die Solling-Formation wird nach amtlicher Übereinkunft (Arbeitsausschuss Buntsandstein der Geologischen Landesämter 1974) in den Mittleren Buntsandstein gestellt, von BACKHAUS (1975) jedoch aus genetischen Gründen in den Oberen Buntsandstein.

\*\*) Die stratigraphische Stellung des Felsandsteins wird diskutiert. BACKHAUS et al. (2002) und BACKHAUS & SCHWARZ (2003) sehen ihn als eigenständige Sedimentationseinheit am Top der Hardeggen-Formation, FREUDENBERGER & FRIEDLEIN (2011) ordnen ihn eher der Solling-Formation zu.

### 4.4.1 Rotliegend

Im Buntsandstein-Odenwald besteht das Rotliegend, bedingt durch die Lage auf der permzeitlichen Odenwald-Spessart-Schwelle, überwiegend aus Brekzien und Mittel- bis Grobsandsteinen und schwankt stark in seiner Mächtigkeit (0 bis über 100 m). Es handelt

sich um Schuttfächersedimente und Ablagerungen verflochtener Flüsse. Auf die Rotliegend-Sedimente des Sprendlinger Horstes wird in Kapitel 4.5 näher eingegangen.

### 4.4.2 Zechstein

Der Zechstein ist im Odenwald nur an der Basis karbonatisch entwickelt: Randmarine, fossilführende oder oolithische Dolomite, z. T. mit Mergelstein-Einschaltungen, bilden die Zechsteindolomit-Formation (z1-Folge, Tab. 4.1; CHELIUS 1897, BECKSMANN 1958, BACKHAUS 1961, PAUL 1985, HUG & VERO 2008, NITSCH & ZEDLER 2009). Die Karbonate sind häufig stark verkarstet und am Top eisen- und manganvererzt. Darüber liegen lokal graue, z. T. leicht plastische und ebenfalls vererzte Tonsteine bzw. Tone (Zechsteinton, gehört zur Zechsteindolomit-Formation).

Die Mächtigkeit der Zechsteindolomit-Formation schwankt im Odenwald sehr stark, beträgt jedoch meist nicht mehr als 8 m. Nach NW, zur Odenwald-Spessart-Schwelle hin, keilt die Formation rasch aus. Nach SE, zum Fränkischen Becken hin, wird sie wesentlich mächtiger, lokal sogar bis über 60 m (Bad König; Abb. 3 in Hug & Vero 2008). Diese beträchtlichen Mächtigkeitsschwankungen spiegeln das Paläorelief und die ausgeprägte Gliederung des

Randes der Odenwald-Spessart-Schwelle in schmale Buchten, Inseln und Vorsprünge des kristallinen Grundgebirges zur Zeit der Transgression des Zechsteinmeeres wider.

Rotbraune, karbonatfreie Ton-Schluffsteine (Pelite) mit einzelnen Feinsandsteinlagen, früher als „Schieferletten“ oder „Bröckelschiefer“ zum Unteren Buntsandstein gerechnet, zählen heute ebenfalls zum Zechstein und werden als Langenthal-Formation bezeichnet (HUG & VERO 2008, NITSCH & ZEDLER 2009, NITSCH 2013; Tab. 4.1). Ihre Mächtigkeit schwankt im hessischen Odenwald zwischen knapp 15 und 50 m (Bad König). Diese Sedimente sind im terrestrischen Milieu am Rand der Sabkha-Ebene des Hessischen Zechstein-Beckens abgelagert worden. Nach Süden schalten sich immer mehr Sandsteine in die Langenthal-Formation ein, und im nördlichen Baden-Württemberg verzahnt sie sich schließlich mit der randfaziellen Tigersandstein-Formation (NITSCH & ZEDLER 2009).

### 4.4.3 Buntsandstein

Der Odenwälder Buntsandstein besteht aus einer relativ monotonen Abfolge von überwiegend Sandsteinen, untergeordnet von Ton-Schluffsteinen. Die geringe lithologische Diversität erschwert die stratigraphische Gliederung, die deshalb hauptsächlich auf relativen denn auf absoluten Kriterien gründet. Die Grenzen der meisten stratigraphischen Einheiten sind daher nicht scharf definiert. Im Folgenden werden nur die wesentlichen Merkmale der einzelnen lithostratigraphischen Einheiten

genannt, ausführliche Beschreibungen und Verweise auf eingehendere Untersuchungen finden sich in BACKHAUS (1975), BINDIG & BACKHAUS (1995), BACKHAUS et al. (2002) und BACKHAUS & SCHWARZ (2003), sowie in den Erläuterungen der Geologischen Karten 1 : 25 000 des Odenwaldes. Die im Folgenden für die einzelnen stratigraphischen Einheiten angegebenen Mächtigkeiten sind aus den o. g. Veröffentlichungen abgeleitet.

## Unterer Buntsandstein

Ablagerungen des Unteren Buntsandsteins sind im Westen des Buntsandstein-Odenwaldes in einem rund 10 km breiten Streifen aufgeschlossen, während sie im übrigen Gebiet nur in Taleinschnitten zu Tage treten. Die gesamte Abfolge ist etwa 200–240 m mächtig und wird von unten nach oben in den Heigenbrücken-Sandstein, den Eck'schen Geröllsandstein und die Miltenberg-Formation (Tab. 4.1) gegliedert. Es handelt sich um Bodenfracht-Ablagerungen verflochtener, überwiegend wenig kanalisierter Flusssysteme. Überflutungsebenen-Sedimente sowie Anzeichen mäandrierender Flussrinnen oder äolischer Transportbeteiligung sind nur im höchsten Teil des Unteren Buntsandsteins (Miltenberg-Wechselfolge) erhalten (BACKHAUS & BÄHR 1987).

Die Basis des Heigenbrücken-Sandsteins wird lithostratigraphisch dort gezogen, wo rippel- und horizontalgeschichtete, glimmerführende Feinsandsteine die pelitisch dominierten Sedimente der Langenthal-Formation des Zechsteins ablösen. Die Sandsteine sind häufig rot-

hellgrau gebändert oder grau gefleckt, z. T. weisen sie rundliche braunschwarze Flecken auf, die früher als Tigerflecken bezeichnet wurden. Der Heigenbrücken-Sandstein erreicht im Odenwald eine Mächtigkeit von etwa 15–20 m, maximal bis zu 30 m.

Der Eck'sche Geröllsandstein hebt sich von den anderen Einheiten des Unteren Buntsandsteins durch eine im Süden deutliche Geröllführung ab, die nach Norden hin jedoch stark abnimmt. Im Vergleich zum Heigenbrücken-Sandstein weist er einen etwas höheren Feldspatgehalt auf. Die Sandsteine sind in der Regel stark quarzitisch zementiert (eingekieselt) und bilden eine deutliche morphologische Stufe, oberflächennah zerfallen sie jedoch auch häufig zu mürbem Sand. Der Eck'sche Geröllsandstein wird etwa 40–50 m mächtig. Da das Charakteristikum des Eck'schen Geröllsandsteins – seine Geröllführung – regional verschieden deutlich ausgeprägt ist, kann seine Abgrenzung gegen die liegenden und hangenden Einheiten erhebliche Schwierigkeiten bereiten.



**Abb. 4.10:** Unterer Buntsandstein, Miltenberg-Wechselfolge, Steinbruch Schmelzer Gaimühle

Die Miltenberg-Formation macht mit 140–160 m Mächtigkeit den Hauptteil des Unteren Buntsandsteins im Odenwald aus. Es handelt sich um sehr gleichmäßig ausgebildete rote, fein- und mittelkörnige, gebankte, mäßig zementierte Sandsteine mit eingelagerten braunroten, bis dm-mächtigen Ton-Schluffsteinen. Letztere sind insbesondere im höheren Teil (Miltenberg-Wechselfolge) eingeschaltet,

der untere Teil ist sandsteindominiert (Miltenberg-Sandstein). Rundliche rotbraune Flecken sind in der gesamten Miltenberg-Formation häufig und waren namensgebend für die frühere Bezeichnung Pseudomorphosensandstein (s. Tab. 4.1 und Abb. 4.11). Sandsteine der Miltenberg-Formation werden bis heute als Werksteine abgebaut.



**Abb. 4.11:** Unterer Buntsandstein, Varietäten in der Miltenberg-Wechselfolge, Steinbruch Schmelzer Gaimühle

### Mittlerer Buntsandstein

Der Mittlere Buntsandstein streicht im östlichen und südlichen Buntsandstein-Odenwald aus und hat eine Mächtigkeit von 130–170 m. Er kann im badischen Odenwald (NITSCH 2013) noch anhand eingeschalteter Geröllsandsteine gegliedert und versuchsweise mit den im zentralen Buntsandstein-Becken und der Hessischen Senke üblichen Formationen Volpriehausen-, Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation korreliert werden. Auch in Main-

franken wird diese Formationsgliederung angewendet (FREUDENBERGER et al. 2013). Deshalb werden auch im hessischen Odenwald die in BACKHAUS (1975) beschriebenen Kartiereinheiten Rohrbrunn- und Geiersberg-Formation, auch von Backhaus selbst, nicht mehr angewendet. Die folgende Beschreibung stützt sich vor allem auf BACKHAUS et al. (2002) und BACKHAUS & SCHWARZ (2003) für den hessischen Odenwald. Die Sedimente des

Mittleren Buntsandsteins wurden hier durch anfangs gering etablierte, meist ephemere (zeitweilig wasserführende) verwilderte Flussläufe abgelagert (Volpriehausen-Formation), später in zunehmend tieferen, stabileren Rinnen verflochtener Flüsse mit zeitweise hoher Transportenergie, die von Überflutungsebenen gesäumt waren (BACKHAUS et al. 2002).

Der Mittlere Buntsandstein beginnt mit der Volpriehausen-Formation (in BACKHAUS 1975 noch gleichgesetzt mit der Rohrbrunn-Formation, gegebenenfalls aber nur deren unterem Teil entsprechend – Tab. 4.1, vgl. z. B. NAGY 1993: 93). Die Volpriehausen-Formation wird etwa 65 m mächtig und besteht vorwiegend aus grobsandigen Mittelsandsteinen mit lagenweise wechselnden Anteilen an Fein- und Grobkorn sowie einigen geringmächtigen pelitischen Zwischenlagen. Typisch für diese Formation ist die gute bis sehr gute Kornrundung der Grobfraktion, ein hoher Anteil an Feldspat sowie die meist schwache Kornbindung. Im unteren Teil der Formation bilden, oft kiesführende, Grobsandsteine bzw. grobsandige Mittelsandsteine (Volpriehausen-Basis-Sandstein) eine deutliche Grenze zum Unteren Buntsandstein. Teilweise können dabei zwei Grobschüttungen differenziert werden. Über den sandig-kiesigen Basislagen schalten sich vermehrt pelitische Lagen ein (Volpriehausen-Weschselfolge), die nach oben zugunsten von Sandsteinen wieder ausklingen können. In der Volpriehausen-Formation können bereits Zonen von kugelig herauswitternden, konkretionären Bildungen auftreten (Kugelhorizonte; Abb. 7 in BACKHAUS et al. 2002).

Die etwa 30 m mächtige Detfurth-Formation setzt mit einer weiteren, jedoch nicht überall deutlich ausgeprägten Grobschüttung aus lagenweise grobsand- bis feinkiesführenden Sandsteinen ein. Darüber dominieren Mittelsandsteine mit wechselndem, nach oben abnehmendem Grobsandanteil und insgesamt wenigen, nach oben häufiger eingelagerten Pelitlagen. Auch in der Detfurth-Formation treten Kugelhorizonte auf. BACKHAUS (1975) setzt die Detfurth-Formation noch der Unteren Geiersberg-Formation gleich; möglicherweise ist jedoch auch noch der obere Teil der Rohrbrunn-Formation mit der Detfurth-Formation zu korrelieren (Tab. 4.1, vgl. NAGY 1993).

Die Basis der Hardeggen-Formation wird durch einen deutlichen Anstieg in Anzahl und Größe der Gerölle markiert. Die Hardeggen-Formation im engeren Sinne (d. h. ohne Felssandstein) wird im Odenwald etwa 30–40 m mächtig und besteht aus meist gleichmäßig kiesführenden Mittel- bis Grobsandsteinen, die häufig quarzitisches gebunden (eingekieselt) sind und daher steile Hänge bilden. Über diesen Sandsteinen liegt der sogenannte Felssandstein: bis 16 m mächtige, sehr hart quarzitisches zementierte Mittel- bis Grobsandsteine mit Geröllen und Hohlräumen durch herausgewitterte Tongerölle. Der Felssandstein tritt durch seine Härte morphologisch deutlich hervor und bildet als Verwitterungsschutt an Hängen charakteristische kubikmetergroße Blöcke. Die stratigraphische Stellung des Felssandsteins – als Teil der Hardeggen-Formation, als eigenständige Formation oder als Teil der Solling-Formation – wird bis heute diskutiert (BACKHAUS et al. 2002, BACKHAUS & SCHWARZ 2003, FREUDENBERGER & FRIEDLEIN 2011, FREUDENBERGER et al. 2013, NITSCH 2013).

Die Solling-Formation beginnt lokal mit geröllführenden Mittel- bis Grobsandsteinen, die dem Felssandstein sehr ähnlich sind und erosiv ins Liegende einschneiden (BACKHAUS 1975). Nach BACKHAUS et al. (2002) variiert die Korngröße der Sandsteine von feinsandig bis konglomeratisch. Den Hauptteil der Abfolge bilden blasse Mittelsandsteine und glimmerhaltige Feinsandsteine mit eingeschalteten Pelitlagen. Lokal ist am Top der Solling-Formation der sogenannte Karneol-Dolomit-Horizont entwickelt, ein pedogen geprägter Bereich mit charakteristischen roten, grauen oder gelben Chalzedon-Konkretionen und -Bändern in mürben Fein- bis Mittelsandsteinen. BACKHAUS (1975) und BACKHAUS et al. (2002) beschreiben in Aufarbeitungshorizonten der Solling-Formation neben Karneol- und Quarzgeröllen auch Buntsandsteingerölle. Die Mächtigkeit der Solling-Formation schwankt im Odenwald stark zwischen etwa 5 m und 15 m. Nach BACKHAUS (1975) fehlt die Solling-Formation bereichsweise sogar vollständig; in der Dieburger Bucht erreicht sie dagegen maximal 24 m (DERSCHHANSMANN & HUG 2004).

Die Trennung von Felssandstein und Solling-Formation bleibt auf Grund deren lithologischer Ähnlichkeit und regional verschiedener Ausprägung

und Kondensation, bis hin zum Fehlen, momentan problematisch. Einstufungen wurden und werden von den Bearbeitern verschieden vorgenommen, die Beschreibungen sind uneindeutig. Als vorläufige Arbeitshypothese wird hier deshalb die in Tab. 4.1 wie-

dergegebene Situation verwendet, in der die Solling-Formation, soweit ausgebildet, den Felssandstein durch erosives Einschneiden teils, ggf. sogar vollständig, ersetzt und dann kaum oder gar nicht von diesem differenziert werden kann.

## Oberer Buntsandstein

Die Vorkommen des Oberen Buntsandsteins, der Röt-Formation, sind auf die Hochflächen des südlichen und östlichen Odenwaldes und auf den Michelstädter Graben beschränkt. Die etwa 60–100 m mächtige Sedimentabfolge lässt sich wie in Mainfranken in die Faziesseinheiten Chirotherienschiefer, Plattensandstein, Untere Röttonsteine, Rötquarzit und Obere Röttonsteine gliedern (Tab. 4.1; BINDIG & BACKHAUS 1995). Es handelt sich um die Ausläufer eines die gesamte Hessische Senke umfassenden Playasystems sowie um Ablagerungen der randlich anschließenden bzw. den Playarand durchquerenden Flussebenen und -läufe (BINDIG & BACKHAUS 1995, BACKHAUS et al. 2002).

Die karbonatischen Schluffsteine des sogenannten Chirotherienschiefers, die den grauen Röt (Röt 1) der Hessischen Senke repräsentieren, reichen als letzte Ausläufer der Playaebene noch bis in den südlichen hessischen Odenwald. Ihre Mächtigkeit geht von etwa 6 m in der Dieburger Bucht und im zentralen Odenwald auf nur noch 1 m im südlichen hessischen Odenwald zurück. Südlich des Neckars gehen die Chirotherienschiefer in die Plattensandstein-Fazies über (NITSCH 2013).

Der Plattensandstein erreicht eine Mächtigkeit von rund 30–50 m und besteht aus sehr gleichförmigen, schluffigen, glimmerschichtigen, plattig aufspaltenden Fein- bis Mittelsandsteinen. Sie werden als Ablagerungen verflochtener bis mäandrierender Flüsse interpretiert (BINDIG & BACKHAUS 1995). Etwa in der Mitte des Plattensandsteins ist im südlichen Odenwald ein bis zu 4 m mächtiger Schluffstein-Abschnitt eingeschaltet, der die Abfolge in den Unteren und den Oberen Plattensandstein teilt. Diese Ausläufer der Unteren Röttonsteine, der Schlammebenen-Sedimente des Playasystems in der Hessischen Senke, verzahnen sich in der Dieburger

Bucht und nach Mainfranken hin mit dem Oberen Plattensandstein (BINDIG & BACKHAUS 1995, DERSCH-HANSMANN & HUG 2004, FREUDENBERGER et al. 2013; Tab. 4.1). Am Top des Plattensandsteins ist stellenweise ein bis zu 2 m mächtiger mürber, wahrscheinlich pedogen überprägter, grau-violetter Horizont mit vereinzelt Dolomitknollen und Karneolen entwickelt, der als Oberer Dolomithorizont bezeichnet wird. Es kann jedoch sowohl im Liegenden als auch im Hangenden ähnliche Horizonte geben (BACKHAUS 1975, BACKHAUS & HEIM 1995, NITSCH 2013).

Der 2–6 m mächtige Rötquarzit besteht aus meist fest quarzitisches zementierten Mittelsandsteinen, die durch herausgelöste Tongerölle und Karbonatkonkretionen auffallend löchrig sind und infolge pedogener Überprägung einen oder mehrere mürbe violette Zonen oder Dolomithorizonte enthalten können. Der Rötquarzit lässt sich trotz seiner geringen Mächtigkeit recht gut bis nach Mainfranken und in die südliche Hessische Senke hinein verfolgen und wird als Basis des Röt 4, als transgredierende Playa-Sandebene, angesehen (BINDIG & BACKHAUS 1995, FREUDENBERGER et al. 2013).

Darüber liegen ca. 25–30 m mächtige rotbraune, glimmerreiche, teils graue, karbonathaltige Schluff- und Tonsteine, die Oberen Röttonsteine, die Ablagerungen der Playa-Schlammebene sind. Besonders in der unteren Hälfte sind dünne fluviatile Feinsandsteinbänke eingelagert, die nach Süden mächtiger werden und dort lokal zum Epfenbacher Sandstein zusammengeschlossen sind. In der oberen Hälfte enthalten die Oberen Röttonsteine z. T. Fossilien, u. a. die marine Muschel *Myophoria vulgaris*, die bereits den Einfluss des Muschelkalkmeeres ankündigt. Die Myophorienschichten sind im Odenwald jedoch nur lokal verbreitet.

#### 4.4.4 Unterer Muschelkalk

Als jüngste triassische Festgesteine sind im zentralen Bereich des Michelstädter Grabens marine Mergel- und Kalkgesteine des Unteren Muschelkalks aufgeschlossen (BACKHAUS & FLÜGEL 1971). Dieser ist lokal verkarstet, wie z. B. die Erdbach-Versickerung

bei Erbach zeigt. Der Übergang des Buntsandsteins zum Muschelkalk ist im Bearbeitungsgebiet von quartären Ablagerungen überdeckt und nicht direkt aufgeschlossen.

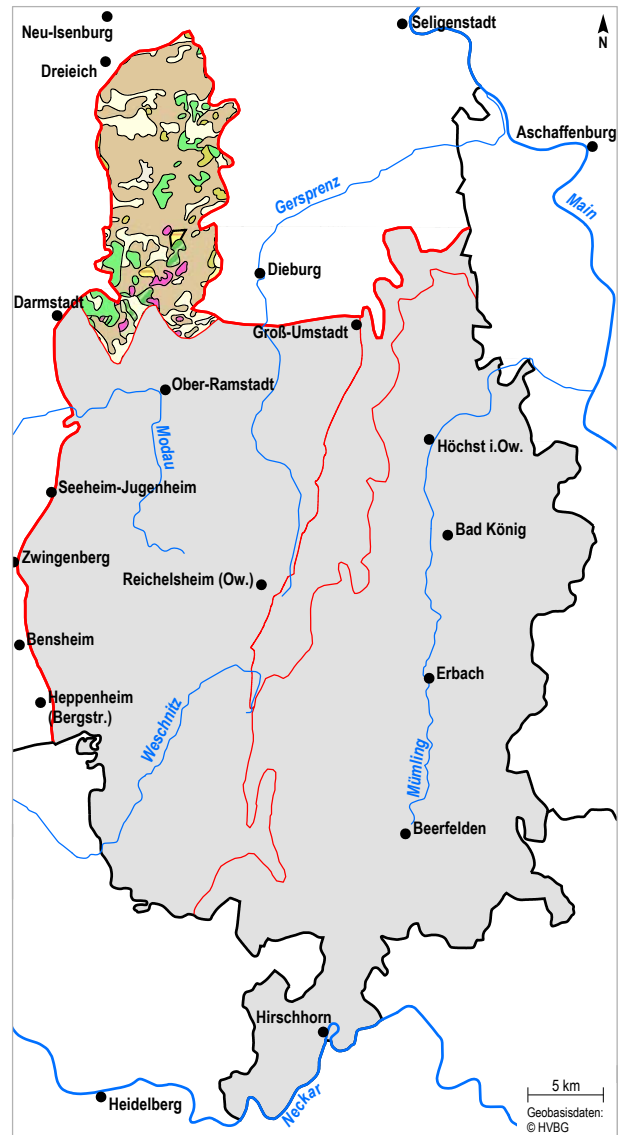


**Abb. 4.12:** Erdbachschwinde bei Erbach, hier versickert der Erdbach im verkarsteten Muschelkalk

## 4.5 Sprendlinger Horst

Im Gebiet des tektonisch herausgehobenen Sprendlinger Horstes sind Rotliegend-Sedimente auf einer Fläche von rund 235 km<sup>2</sup> aufgeschlossen. Im Bereich des heutigen Sprendlinger Horstes verlief während des Karbons und des Rotliegend eine Querschwelle, die das Saar-Nahe-Becken und das Wetterau-Teilbecken (der Hessischen Becken) zuerst vollständig, am Ende des Rotliegend nur noch als etwas höher gelegenes Sedimentationsgebiet voneinander trennte. Dies drückt sich in einer unvollständigen und später erheblich reduzierten permokarbonischen Schichtenfolge aus (KOWALCZYK 2001).

Die Rotliegend-Sedimente des Sprendlinger Horstes wurden von MARELL (1989) eingehend untersucht und stratigraphisch gegliedert, jedoch wird heute für den Sprendlinger Horst die Wetterau-Gliederung nach KOWALCZYK (1983) oder, am westlichen Rand, ggf. auch die im Saar-Nahe-Becken übliche Gliederung empfohlen (KOWALCZYK 2012). Die Sedimentation beginnt auf dem Sprendlinger Horst demnach mit fluviatilen Sandsteinen der Schöneck-Formation (MARELL: Langen-Schichten und Roßdorf-Schichten, Saar-Nahe-Becken: Donnersberg-Formation), die z. T. Vulkanitgerölle führen und in die stellenweise Vulkanite, im obersten Abschnitt auch dünne Algenkalke (früher Plattenkalke) eingeschaltet sind. Die jüngsten Sedimente sind in einer Playaebene abgelagert worden: rote Schluff- und Feinsandsteine der Bleichenbach-Formation (MARELL: oberste Langen-Schichten, Dieburg-Schichten, Saar-Nahe-Becken: Standenbühl-Formation.). Konglomerate und Brekzien stellen eine randliche Schuttfächerfazies dieser beiden Formationen dar und werden als Rodenbach-Formation bezeichnet (MARELL: Moret-Schichten, Saar-Nahe-Becken: Wadern-Formation.).



**Abb. 4.13:** Sprendlinger Horst, Ausschnitt aus der GÜK 300 (HLUG 2007), (Legende siehe Abb. 4.1)



## 4.6 Tertiär und Quartär des Oberrheingrabens

Die quartäre Grabenfüllung des Oberrheingrabens besteht aus Lockersedimenten pleistozänen Alters, die tertiäre aus dem Pliozän und Miozän. Die tertiären Sedimente können bis zu 2.000 m, die quartären Sedimente über 100 m mächtig sein (FRITSCHÉ et al. 2003).

In HOSELMANN et al. (2014) wird anhand von 9.798 qualitätsgeprüften Bohrschichtenverzeichnissen und Informationen aus der Kohlenwasserstoffexploration die Tiefenlage der Quartärbasis neu abgeleitet. Sie ist als tektonisch beeinflusst beschrieben und liegt in Tiefen zwischen 240 m u. NN. und 116,5 m ü. NN.

Räumliche Untergliederungen, stratigraphische Aspekte und fazielle Änderungen werden durch

die Beschreibung als lithostratigraphische Einheiten berücksichtigt. Vier Einheiten beschreiben das Quartär und Tertiär des Nördlichen Oberrheingrabens:

- Mannheim-Formation
- Ludwigshafen-Formation
- Viernheim-Formation
- Iffezheim-Formation

Die siliziklastischen Lockersedimente sind im Nahbereich der östlichen Grabenrandverwerfung durch mehrere, teilweise lückenhaft ausgebildete Tonhorizonte getrennt (FRITSCHÉ et al. 2003). Der obere Zwischenhorizont (OZH, nach HGK 1999) ist ein wichtiger, flächig weit verbreiteter Horizont, der den oberen vom mittleren Grundwasserleiter trennt.

Hydrogeologische Kartierung Rhein-Neckar-Raum (1997–1999)			Neue lithostratigraphische Gliederung für den nördlichen Oberrheingraben		
Lithostratigraphische Gliederung	Hydrogeologische Gliederung				
Jungquartär	Deckschichten	Deckschichten		Mannheim-Formation	
	Oberes Kieslager (OKL)	oOKL OGWLo ZH1 uOKL OGWLu	Oberer Grundwasserleiter (OGWL)		
	Oberer Zwischenhorizont (OZH)	Oberer Zwischenhorizont (OZH)			
	Mittlere sandig-kiesige Abfolge	ZH2	MGWLo	MGWLo	Viernheim-Formation
		ZH3	MGWLu	MGWLu	
		MGWLu	MGWLu		
Unterer Zwischenhorizont (UZH)	Unterer Zwischenhorizont (UZH)				
Untere sandig-kiesige Abfolge	Unterer Grundwasserleiter (UGWL)				
Altquartär (Pliozän)					
Miozän	Aquifersohlschicht		Iffezheim-Formation		

**Abb. 4.14:** Lithostratigraphische und hydrogeologische Gliederung des Rhein-Main-Neckar-Raums (HGK 1999) sowie die neue lithostratigraphische Gliederung (HOSELMANN & LEHNÉ, 2014)

Der OZH ist nach HOSELMANN et al. (2014) ein Teil der Ludwigshafen-Formation. Eine Vielzahl von Bohrungen zeigt, dass der OZH im nördlichen Oberrheingraben nicht durchgehend ausgebildet ist und somit bereichsweise eine hydraulische Verbindung zwischen oberem und mittlerem Grundwasserleiter besteht.

Abbildung 4.14 enthält eine Gegenüberstellung der lithostratigraphischen und hydrogeologischen Gliederung des Rhein-Main-Neckar-Raums (HGK 1999) sowie die neue lithostratigraphische Gliederung nach HOSELMANN & LEHNÉ (2014).

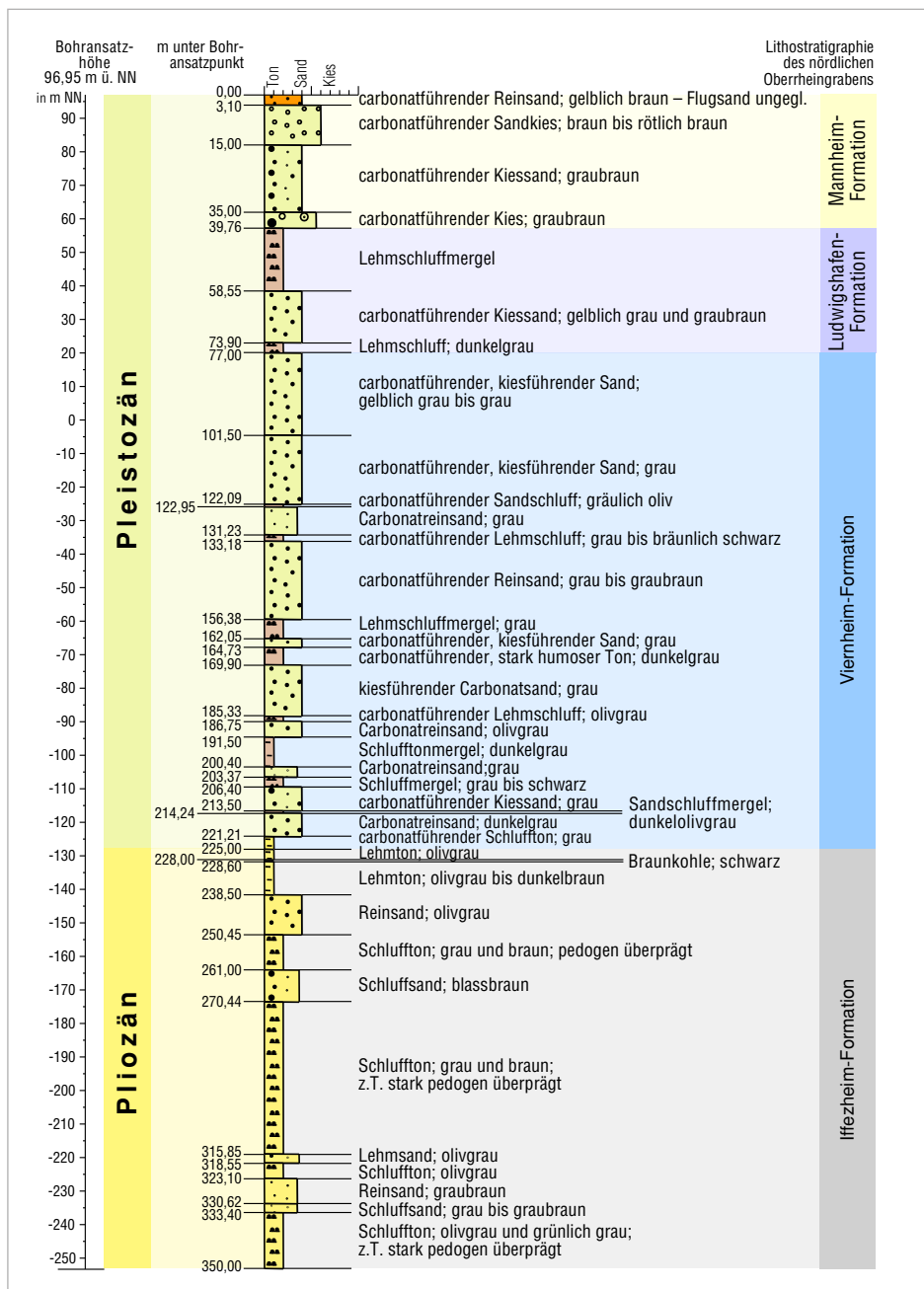


Abb. 4.15: Kurzprofil der Forschungsbohrung Viernheim, Quartär und Tertiär (HOSELMANN & LEHNÉ, 2014)

## 4.7 Tertiär und Quartär der Untermainebene

Die Untermainebene (Hanauer Becken) gehört zu den Tertiärgräben und -senken. Sie besteht aus den Teilflächen Hanau-Seligenstädter Senke, Dieburger Becken und Reinheimer Randscholle und liegt östlich des Sprendlinger Horstes, nordöstlich des Kristallinen Odenwaldes und nordwestlich des Buntsandstein-Odenwaldes.

Die Untermainebene entstand durch das Herausheben des Sprendlinger Horstes und gleichzeitiger Absenkung des Untermainbereichs. Die Füllung besteht überwiegend aus fluviatilen, siliziklastischen oder organischen tertiären und quartären Ablagerungen. Neben Ablagerungen von vorwiegend pleistozänen Kiesen und Sanden des Mains sind pliozäne Tone und Sande verbreitet. Auf der Ostseite des Sprendlinger Horstes sind flächenhaft Flugsande verbreitet, die von Tonen unterlagert werden. Im Bereich Groß-Umstadt wurde Löss in großer Mächtigkeit abgelagert.

Die pliozäne Entwicklungsgeschichte der Hanau-Seligenstädter Senke und der östlich angrenzenden Mittelgebirge wird in LANG (2012) wie folgt zusammengefasst:

Der Beginn des Pliozäns ist gekennzeichnet durch eine enorme Eintiefung des Mains und seiner Nebenflüsse in das miozäne Flachrelief. Diese Tiefenerosion reicht im Gründautal und im Kahlthal im Vorspessart fast bis zum heutigen Talboden, im Kinziggebiet lokal sogar weit unter das später während des Pleistozäns erreichte Niveau. Im Kinzigtal bei Wächtersbach beträgt die Differenz zum miozänen Ausgangsniveau mindestens 100 m. Selbst im Senkungsgebiet Hanau-Seligenstädter Senke weist diese Einschneidungsperiode Beträge von mindestens 75 m auf. Bereits ab dem frühen Pliozän kam es zur Wiederauffüllung des Untermaintales und seiner Nebentäler mit Flussablagerungen. Im Zuge dieses Akkumulationsvorgangs wurden mehrere Zehnermeter mächtige Sedimente abgelagert; im Kinzigtal und wahrscheinlich auch in der Hanau-Seligenstädter Senke wiesen die Ablagerungen sogar ursprünglich Mächtigkeiten bis über 100 m auf. Während der pliozänen Aufschüttungsphase hinterließen der Main und seine Nebenflüsse in den Tälern der Mittelgebirge vorwiegend sandig-kiesige, teils blockführende Flussbettablagerungen, ebenso an der Basis der meisten anderen Vorkommen.

Auenlehme und Seeablagerungen mit Kohlen wurden danach insbesondere in den Tälern in der Hanau-Seligenstädter Senke häufiger gebildet. In kleineren Tälern in der östlichen Hanau-Seligenstädter Senke entwickelten sich Seenlandschaften und Moore. An steilen Talflanken kam es lokal zu Murabgängen. Die Ursache für diese Erosions- und Aufschüttungsvorgänge liegt wahrscheinlich in Kippbewegungen der Süddeutschen Großscholle. Die quartären Wiederausräumungsphasen erreichten in den meisten Tälern des Bearbeitungsgebietes nicht das Ausmaß und die Tiefe der pliozänen Erosion. Aus diesem Grund kann die pliozäne Erosion als der eigentliche Talbildungsvorgang in diesem Gebiet bezeichnet werden.

Nach einer zusammenfassenden Beschreibung in LANG (2007) sind im Gegensatz zu den Einheiten im Liegenden die pliozänen Sedimente in der Hanau-Seligenstädter Senke nicht flächenhaft verbreitet.

In großen Gebieten liegen pleistozäne Kiese diskordant auf miozänen Sedimenten oder Vulkaniten auf. Die kleinräumigen Vorkommen im Osten der Hanau-Seligenstädter Senke sind gegenüber der sonst sandig-tonigen und kiesführenden Fazies durch mehrere Zehnermeter mächtige Abfolgen von Braunkohlenflözen und Tonen charakterisiert und damit leicht von der dort vorherrschenden miozänen Randfazies unterscheidbar. Die kleinräumigen Vorkommen sind an etwa Nordost-Südwest und Nord-Süd verlaufende, wenige hundert Meter breite, erosive Rinnen gebunden. Die Braunkohle führenden Rinnen sind offensichtlich tributär zu einer Südost-Nordwest verlaufenden, etwa 9 km breiten, aus dem Mittelmaintal kommenden sowie einer etwa Ostnordost-West-südwest verlaufenden, ca. 2,5 km breiten Hauptrinne im Norden.

Die Verbreitung mehrere Zehnermeter mächtiger unter- bis mittelpleistozäner Ablagerungen ist deutlich großflächiger als die der pliozänen Sedimente und umfasst den mittleren und südlichen Teil der Hanau-Seligenstädter Senke. Die nördliche Grenze ist erosiv in miozäne Sedimente eingeschnitten. Im Osten wurden die Sedimente durch das heutige Maintal bis auf Erosionsreste am östlichen Beckenrand vollständig abgetragen. Auf der Stockstadt/Groß-Umstädter Scholle im Südwesten setzen sich die Ablagerungen jeweils in einer Erosionsrinne fort.

Oberpleistozäne fluviatile Sande und Kiese bilden die Böden der heutigen Flusstäler. Ehemalige Talböden sind als geringmächtige, lokale Terrassenreste erhalten. Äolische Sande und Löss in variabler Mächtigkeit bedecken weite Teile der Beckenfüllung und die Hochgebiete der Beckenränder großflächig.

Die Hanau-Seligenstädter Senke ist asymmetrisch und durch eine vom Sprendlinger Horst nach Osten absteigende Schollentreppe charakterisiert.

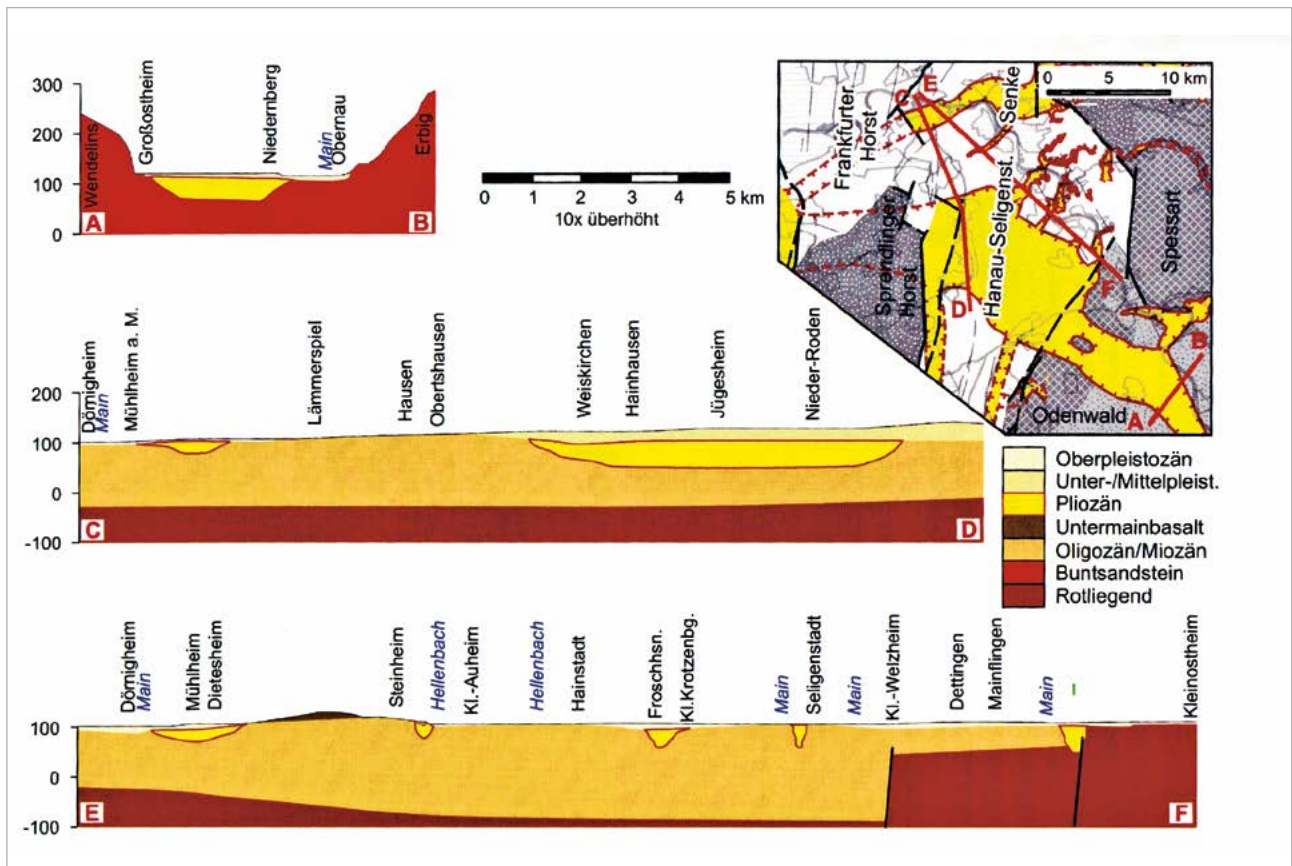


Abb. 4.16: Querschnitte durch die pliozänen Paläotäler in der Hanau-Seligenstädter Senke (LANG & SEIDENSCHWANN 2012)

## 4.8 Strukturgeologische Verhältnisse

Tektonische Strukturen wie Störungszonen und Klüfte haben einen erheblichen Einfluss auf die Wasserwegsamkeiten innerhalb der einzelnen geologischen Teilräume.

Potenzielle Wasserwegsamkeiten sind an Störungen und Klüften parallel zum rezenten Hauptspannungsfeld der Region des Oberrheingrabens (NW-SE und NNW-SSE) geknüpft. Kluftmessungen in Steinbrüchen zeigen einen Zusammenhang der genannten Richtungen mit offenen, teilweise weitständigen Klüften. In Tab. 4.2 sind die identifizierten Haupt- und Nebenmaxima der tektonischen Streichrichtungen aufgeführt.

Als dominierende tektonische Elemente sind die Rheingrabenrandstörung am Westrand des Odenwaldes, die westlichen und östlichen Abschiebungen des Sprendlinger Horstes, der Michelstädter Graben im Buntsandstein-Odenwald und die Otzberg-Störung zwischen dem Kristallin des Bergsträßer und des Böllsteiner Odenwaldes zu nennen.

In den angrenzenden Gebieten ist die Grabenstruktur der Untermainebene das wichtigste tektonische Element. Nach Süden zum Odenwaldrand bilden der Gersprenzgraben und die Dieburger Bucht bedeutende tektonische Strukturen.

**Tab. 4.2:** Haupt- und Nebenmaxima der tektonischen Streichrichtungen

Hauptmaxima	
NNE-SSW	0°–30°
NW-SE	110°–140°
NE-SW	30°–50°
Nebenmaxima	
NNW-SSE	150°–180°
WNW-ESE	90°–110°
ENE-WSW	50°–80°

## 5 Hydrogeologie

### 5.1 Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist eine zentrale Größe bei der nachhaltigen Bewirtschaftung von Grundwasser und ein Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen. Das nutzbare Grundwasserdargebot ist durch die mittlere Grundwasserneubildung nach oben begrenzt, meist jedoch erheblich kleiner als diese. Die Gegenüberstellung von Grundwasserdargebot und Grundwasserbedarf ist eine zwingende Voraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen und ist für die mengenmäßige Beschreibung der Grundwasserkörper nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) (vergl. Kapitel 6.3.2) sowie für wasserrechtliche Genehmigungsverfahren zur Grundwasserentnahme vorgeschrieben. Hierzu sind detaillierte Kenntnisse der Wasserhaushaltsgrößen unverzichtbar.

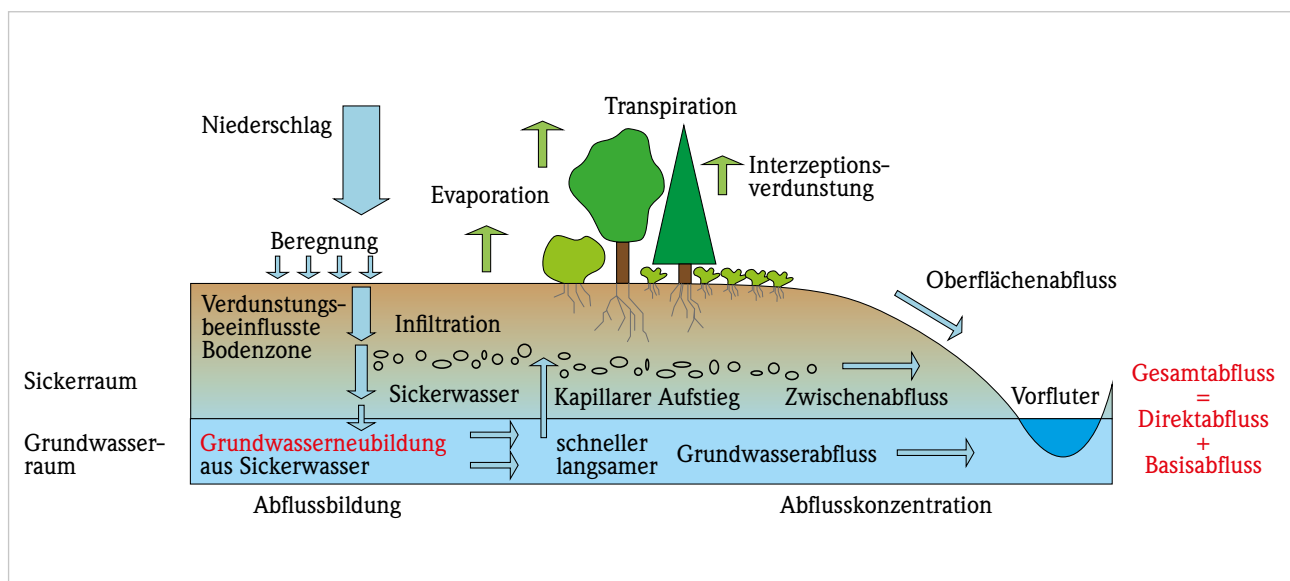
Nach DIN 4049-3 wird unter Grundwasserneubildung der Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden. Das Volumen des auf einer bestimmten Fläche infiltrierten Wassers

in einer bestimmten Zeit ergibt die Grundwasserneubildungsrate. Wie beim Abfluss wird unterschieden zwischen der Grundwasserneubildungshöhe [mm/a] und der Grundwasserneubildungsspende [ $l/(s \cdot km^2)$ ]. Letztere wird auf eine definierte Fläche, das unterirdische Einzugsgebiet, bezogen (HÖLTING & COLDEWEY 2013).

Als residuale Komponente der Wasserbilanz stellt die Grundwasserneubildung (GWN) aus Niederschlag den um die tatsächliche Verdunstung (Evapotranspiration,  $ET_a$ ) und schnelle laterale Abflusskomponenten ( $Q_{\text{direkt}}$ ) reduzierten Anteil der Niederschlagshöhe (N) dar (Abb. 5.1):

$$GWN = N - ET_a - Q_{\text{direkt}}$$

Die räumliche Differenzierung der Grundwasserneubildung zeichnet sich durch den großräumigen Einfluss des Niederschlags und die kleinräumig wirkenden Auswirkungen der Standortfaktoren Boden, Landnutzung, Relief und Hydrogeologie aus.



**Abb. 5.1:** Abflusskomponenten des terrestrischen Wasserkreislaufs (BMU 2003) – bearbeitet durch das HLNUG

Im Gegensatz zu anderen Wasserhaushaltsgrößen kann die Grundwasserneubildung nicht flächenhaft direkt gemessen werden. Sie lässt sich jedoch durch unterschiedliche Verfahren und Methoden indirekt ermitteln. Zur flächenbezogenen Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate wird generell empfohlen mehrere voneinander unabhängige Verfahren einzusetzen (Arbeitskreis Grundwasserneubildung 1977). Daher wurde für den Odenwald und den

Sprendlinger Horst die Grundwasserneubildung mit drei unterschiedlichen Methoden, die in den nachfolgenden Kapiteln erläutert werden, ermittelt:

- Trockenwetterabflussmessungen (Stichtagsmessungen)
- Auswertung langjähriger Pegelraten
- Bodenwasserhaushaltsmodellierung

### 5.1.1 Ermittlung der Grundwasserneubildung durch Abflussmessungen

Die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate eines Gebietes aus Abflussdaten beruht auf der Möglichkeit, den Gesamtabfluss ( $Q_{\text{gesamt}}$ ) in schnelle laterale Abflusskomponenten ( $Q_{\text{direkt}}$ ), die der Summe aus Oberflächen- und Zwischenabfluss entsprechen, und einem dem Grundwasser entstammenden Anteil, der als Basisabfluss ( $Q_{\text{basis}}$ ) den Vorfluter speist, zu zerlegen (Abb. 5.1):

Die unterschiedlichen Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus dem Abfluss in Vorflutern gehen davon aus, dass in Trockenwetterzeiten der gesamte Abfluss ausschließlich dem Grundwasser entstammt. Auf der Skala von Jahreswerten entspricht die Grundwasserneubildung näherungsweise dem Basisabfluss:

$$N - ET_a = Q_{\text{gesamt}}$$

$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{direkt}} + Q_{\text{basis}}$$

$$\text{GWN} = Q_{\text{basis}}$$

#### 5.1.1.1 Ermittlung der Grundwasserneubildung durch Einzelmessungen des Trockenwetterabflusses

Für eine Abschätzung von Gebietswerten der Grundwasserneubildung können Einzelmessungen des Trockenwetterabflusses herangezogen werden (Arbeitskreis Grundwasserneubildung 1977). Erfahrungsgemäß liegen die dabei gewonnenen absoluten Werte im Allgemeinen unter der langjährig mittleren Grundwasserneubildung.

rate innerhalb eines größeren Einzugsgebietes liefern kann. So können durch die Bewertung des Trockenwetterabflusses oft Gebiete mit unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften abgegrenzt werden.

Das Verfahren eignet sich dennoch für großräumige hydrogeologische Kartierungen und Systembeschreibungen, da es wertvolle Anhaltspunkte über die flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildungs-

In Zusammenarbeit des HLNUG mit dem Regierungspräsidium Darmstadt wurden im September 2004 innerhalb einer Woche an insgesamt 293 temporären Messstellen einmalig die Abflüsse von Fließgewässern in den drei hydrogeologischen Teilräumen und den angrenzenden Randgebieten gemessen (siehe Tab. 5.1):

**Tab. 5.1:** Anzahl der Abflussmessungen bezogen auf die einzelnen Teilräume

Gebiet	Teilraum	Anzahl Messstellen
Bilanzierungsgebiet	Kristalliner Odenwald	122
	Buntsandstein-Odenwald	96
	Sprendlinger Horst	25
Randgebiete	Oberrheingraben/Hessisches Ried	22
	Hanau-Seligenstädter Senke	28
<b>Gesamtzahl Messstellen</b>		<b>293</b>

Die Erfassung der Abflussraten erfolgte bei bekannter Gewässergeometrie mit Hilfe eines Anemometers, eines Messflügels oder, bei kleineren Gewässern, direkt über Gefäßmessungen. Abb. 5.2 zeigt die im Jahr 2004 gemessenen Trockenwetter-Abflussspenden (nicht um anthropogene Einflüsse wie Grundwasserentnahmen und Einleitungen in Vorfluter bereinigt). Die Abflussspenden sind für den Kristallinen Odenwald im Bereich der bekannten Vergrusungszone, die sich von SW nach NO parallel zum östlichen Rand des Kristallinen Odenwaldes erstreckt, mit  $> 4 \text{ l/s}$  deutlich gegenüber anderen Bereichen erhöht.

An 47 Messstellen konnten auf Grund des Trockenfallens des Gewässers oder wegen zu geringer Wassermengen keine plausiblen Abflusswerte gemessen werden. Dabei handelt es sich überwiegend um Messstellen mit Einzugsgebieten östlich der Hauptwasserscheide des Sprendlinger Horstes (schrattierte Flächen in Abb. 5.2). Bis auf ein Einzugsgebiet (Schwarzbach) im westlichen Sprendlinger Horst handelt es sich dabei um Quellgebiete (Kopfgebiete).

Das Trockenfallen der Teileinzugsgebiete liegt sowohl in der der Messung vorausgegangenen niederschlagsarmen Zeit, als auch in den geringen Speicherkoeffizienten des Rotliegendes des Sprendlinger Horstes begründet, welches aus einer Wechsellagerung von feinkörnigen Sand- und Schluffsteinen, Tonsteinen sowie Vulkaniten besteht, wobei die Ton- und Schluffsteine überwiegen.

Weiterhin ergab die Auswertung der Messdaten, dass bei ca. 30 Teileinzugsgebieten der gemessene Abfluss geringer war als der gemessene Zufluss (gelb abgestufte Flächen in Abb. 5.2). Solche Bereiche mit Abflussabgaben (negative Abflussspenden) liegen vor allem in Gebieten mit Störungzonen. Doch nicht alle

Teileinzugsgebiete mit Abflussabgaben lassen sich mit bekannten Störungzonen korrelieren.

Es wurde ein Abgleich für die während der Messkampagne zu den Trockenwetterabflüssen im Jahr 2004 festgestellten Teileinzugsgebiete durchgeführt, in denen ein geringerer Abfluss als Zufluss festgestellt wurde. Im Hinblick auf die Lage von Grundwasserentnahmen in diesen Bereichen zeigte sich, dass es keinen signifikanten Zusammenhang gibt.

Ein Abgleich mit den Höhenstrukturen zeigt, dass sich im Kristallinen Odenwald die Teilgebiete mit geringeren Abflussabgaben eher am Verlauf der Störungzonen und Teilgebiete mit höheren Abflussabgaben eher am Verlauf der Täler orientieren. Für den Buntsandstein-Odenwald lässt sich ein solcher Zusammenhang nicht feststellen.

Für die Teileinzugsgebiete mit Abflusszuwächsen lässt sich aus den Höhenstrukturen ableiten, dass die höchsten gemessenen Abflusszuwächse jeweils in den Teileinzugsgebieten der Unterläufe der Bäche zu finden sind. Jedoch nehmen die Abflusszuwächse im Verlauf der Bäche nicht kontinuierlich zu.

Die Zusammenschau der o.g. Teileinzugsgebiete mit den vorhandenen geologischen Strukturen (Abb. 5.3) zeigt, dass sich Flächen mit Abflussverlusten überwiegend im Bereich von geologischen Störungzonen befinden, so am Übergang zum Nördlichen Oberrheingraben, am Übergang vom Bergsträßer zum Böllsteiner Odenwald und im Bereich des Michelstädter Grabens. Ein Vergleich mit den Siedlungsflächen zeigt, dass ein anthropogen verursachter Einfluss unwahrscheinlich ist, wobei dieser lokal nicht auszuschließen ist.



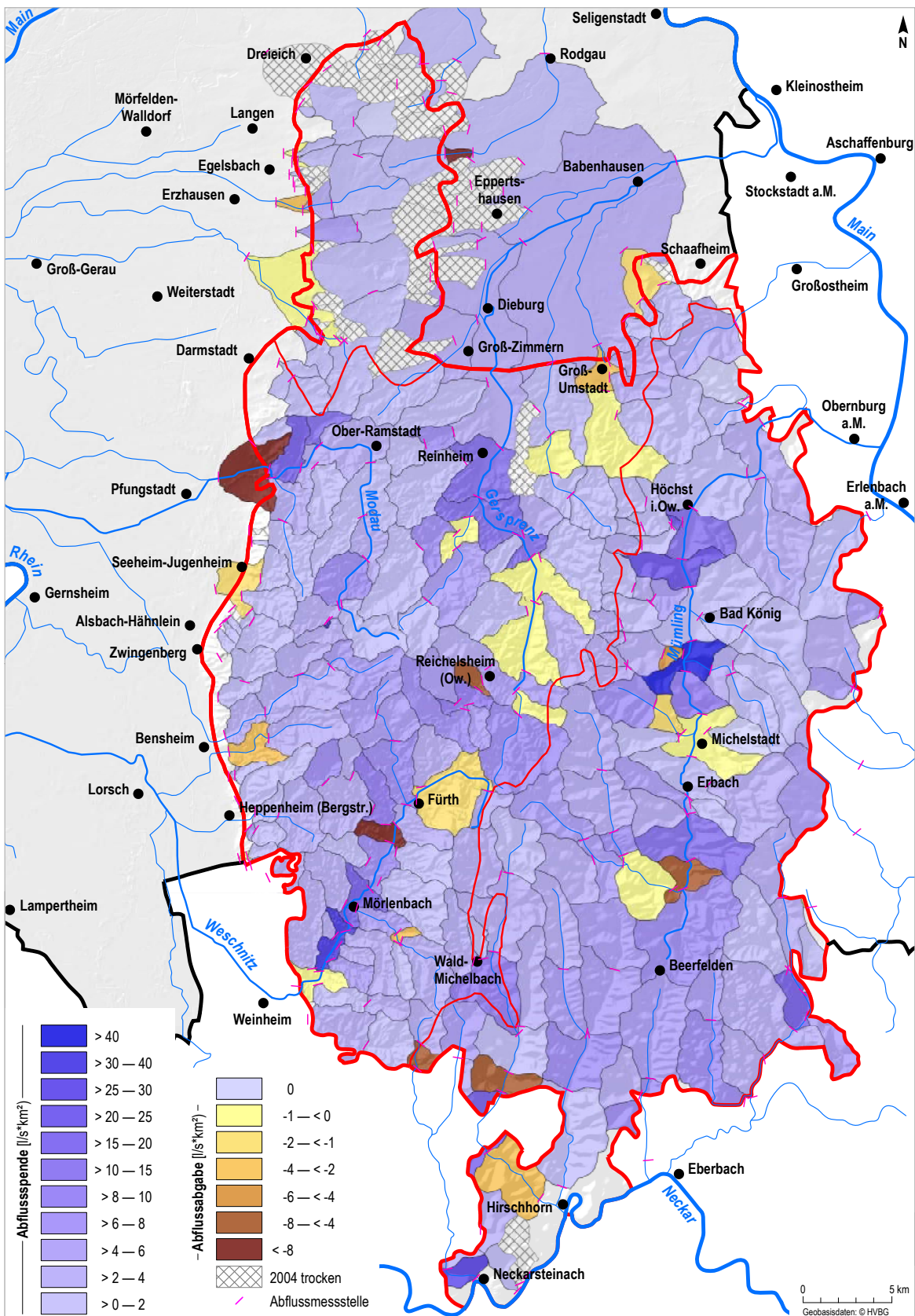


Abb. 5.2: Abflusspenden und Abflussabgaben (Trockenwetterabflussmessungen 2004) in  $l/s \cdot km^2$  mit temporären Abflussmessstellen

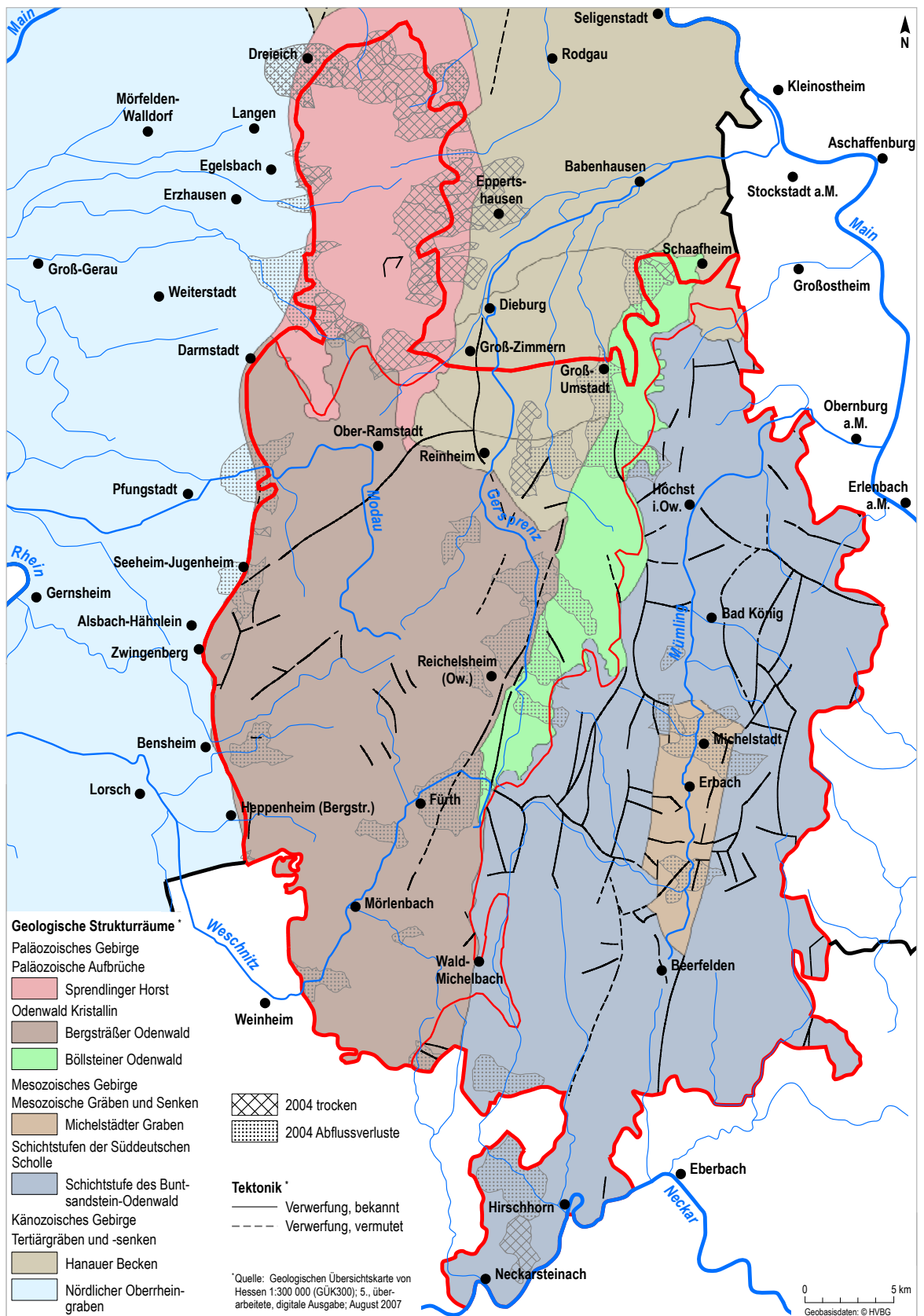


Abb. 5.3: Zusammenhang zwischen Ergebnissen der Trockenwetterabflussmessung im Jahr 2004 und geologischen Strukturen

### 5.1.1.2 Ermittlung des langjährig mittleren Niedrigwasserabflusses anhand langjähriger Abfluss-Messreihen

Während eine einmalige Messung des Trockenwetterabflusses nur eine Momentaufnahme darstellt und in der Regel nur Näherungswerte für die Grundwasserneubildung liefert, bietet die Auswertung langjähriger Abfluss-Messreihen (> 10 Jahre) wesentlich belastbarere Ergebnisse, die auch zur Bearbeitung und Klärung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen genutzt werden können.

Für die Bestimmung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in Festgesteinen werden unterschiedliche Verfahren, wie z. B. die MoMNO-Verfahren nach WUNDT (1958) und KILLE (1970) oder das Au-Linienverfahren nach NATERMANN (1951), vorgeschlagen. Eine weitere Methode ist die Auswertung der langjährigen mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNO) nach DEMUTH (1989), die eine Erweiterung der grafischen Auswertemethode von KILLE (1970) darstellt.

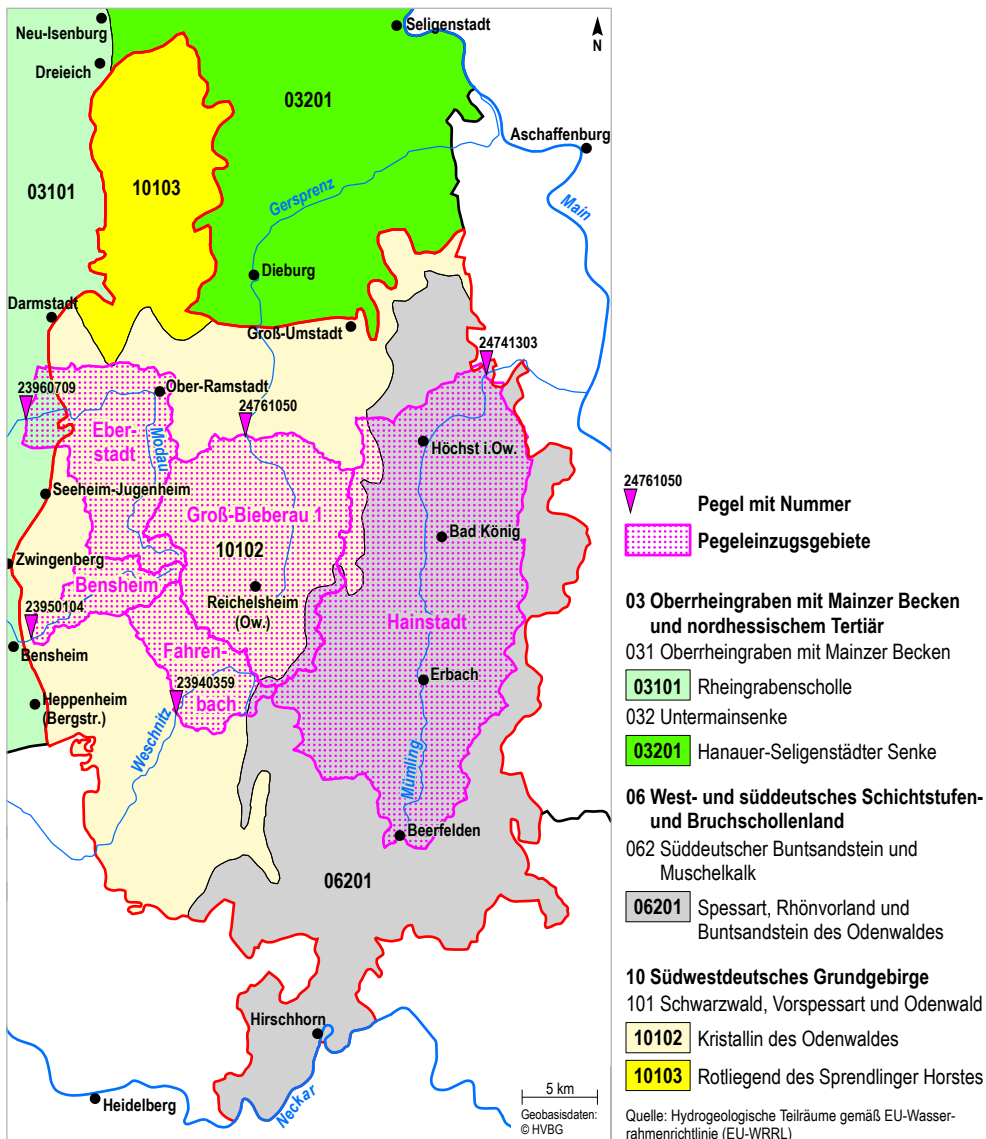


Abb. 5.4: Einzugsgebiete der Langzeit-Abflusspegel (DGJ-Pegel)

Bei den vorliegenden Wasserhaushaltsbetrachtungen wurden die Auswertemethoden nach WUNDT (1958) und DEMUTH (1989) für fünf Abflusspegel mit ausreichenden Einzugsgebietsgrößen im Kristallinen Odenwald und im Buntsandstein-Odenwald angewendet. Die in Abb. 5.4 dargestellten Pegel sind im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Rheingebiet, Teil 1 (DGJ 1998) dokumentiert. Die Einzugsgebiete der Abflusspegel Bensheim (239 50 104), Fahrenbach (239 40 359), Groß Bieberau 1

(247 61 050) und Eberstadt (239 60 709) liegen fast vollständig im Kristallinen Odenwald. Das Einzugsgebiet des Abflusspegels Hainstadt (247 41 303) liegt dagegen nahezu vollständig im Buntsandstein-Odenwald. Die Einzugsgebiete der fünf Abflusspegel decken rund 40 % des Bearbeitungsgebietes ab. Berücksichtigt wurden die Abflusswerte der hydrologischen Jahre 1983 bis 1996.

### Auswertung nach WUNDT (1958)

Nach WUNDT (1958) entspricht der Mittelwert der monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoNQ) in einem mehrjährigen Betrachtungszeitraum ( $n_{Mo}$ ) annähernd dem Basisabfluss ( $Q_{basis}$ ) und damit der Grundwasserneubildung (GWN):

$$MoMNQ (WUNDT) = \frac{\sum MoNQ}{n_{Mo}} = Q_{basis} = GWN$$

Die rein statistisch ermittelten MoMNO-Werte enthalten jedoch oft noch Direktabflussanteile. So wird z. B. im Wasserwirtschaftlichen Rahmenplan Müm-

ling – Gersprenz – Rodau bereits 1977 darauf hingewiesen, dass dieses Auswerteverfahren besonders in weniger höffigen Mittelgebirgsgegenden zu große Werte liefert (Arbeitskreis Grundwasserneubildung 1977). Dies bestätigte sich auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen zum Wasserhaushalt des Odenwaldes.

In Tab. 5.2 sind die Ergebnisse der Auswertungen nach WUNDT (1958) für die hydrologischen Jahre 1983–1996 aufgeführt.

**Tab. 5.2:** Auswertung langjähriger Abflussmessungen (1983–1996) nach WUNDT (5 Abflusspegel)

Bezeichnung	Pegel-Nr.	Gewässer	$A_{EO}$	$MoMNO_{Wundt}$	$MoMNq_{Wundt}$
Einheit			km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/(s·km <sup>2</sup> )
<b>Kristalliner Odenwald</b>					
Bensheim	239 50 104	Lauter	26,8	0,17	6,5
Fahrenbach	239 40 359	Weschnitz	45,1	0,29	6,4
Groß-Bieberau 1	247 61 050	Gersprenz	151,0	0,86	5,7
Eberstadt	239 60 709	Modau	90,6	0,48	5,3
<b>Buntsandstein-Odenwald</b>					
Hainstadt	247 41 303	Mümling	325,0	2,31	7,1

### Auswertung nach DEMUTH (1989)

Beim Demuth-Verfahren werden die monatlichen Niedrigwasserabflüsse einer mindestens zehnjährigen Abflussreihe der Größe nach geordnet. Die subjektive graphische Anpassung der Trennungsgerechten zur Reduktion der Abflusswerte um Oberflächen- und Zwischenabfluss (KILLE 1970) ersetzt DEMUTH (1989) durch eine schrittweise Regression. Nach Ausschluss der unteren 5 % der Werte aufgrund angenommener anthropogener Beeinflussung wird die Regression bis zum 50 %-Wert, beginnend mit drei Abflusswerten und anschließender Hinzunahme des jeweils nächst höheren Monatsminimums, durchgeführt. Danach werden sukzessiv solange weitere Monatsminima hinzugezogen, bis sich eine Maximierung des Korrelationskoeffizienten ergibt.

Lässt sich der Korrelationskoeffizient durch das Hinzunehmen weiterer Werte nicht mehr verbessern, wird die Regressionsgerade berechnet und extrapoliert. Alle monatlichen Niedrigwasserabflüsse oberhalb der Regressionsgeraden werden auf die Gerade reduziert und der mittlere Basisabfluss berechnet (ARMBRUSTER 2002).

In Abb. 5.5 sind die Auswertungen nach DEMUTH (1989) exemplarisch für den Pegel Hainstadt (247 41 303) im Buntsandstein-Odenwald dargestellt. Die Grafik enthält als Vergleichswerte zusätzlich die Ergebnisse der Auswertungen nach WUNDT (1958) und der Trockenwetterabflussmessungen vom September 2004.

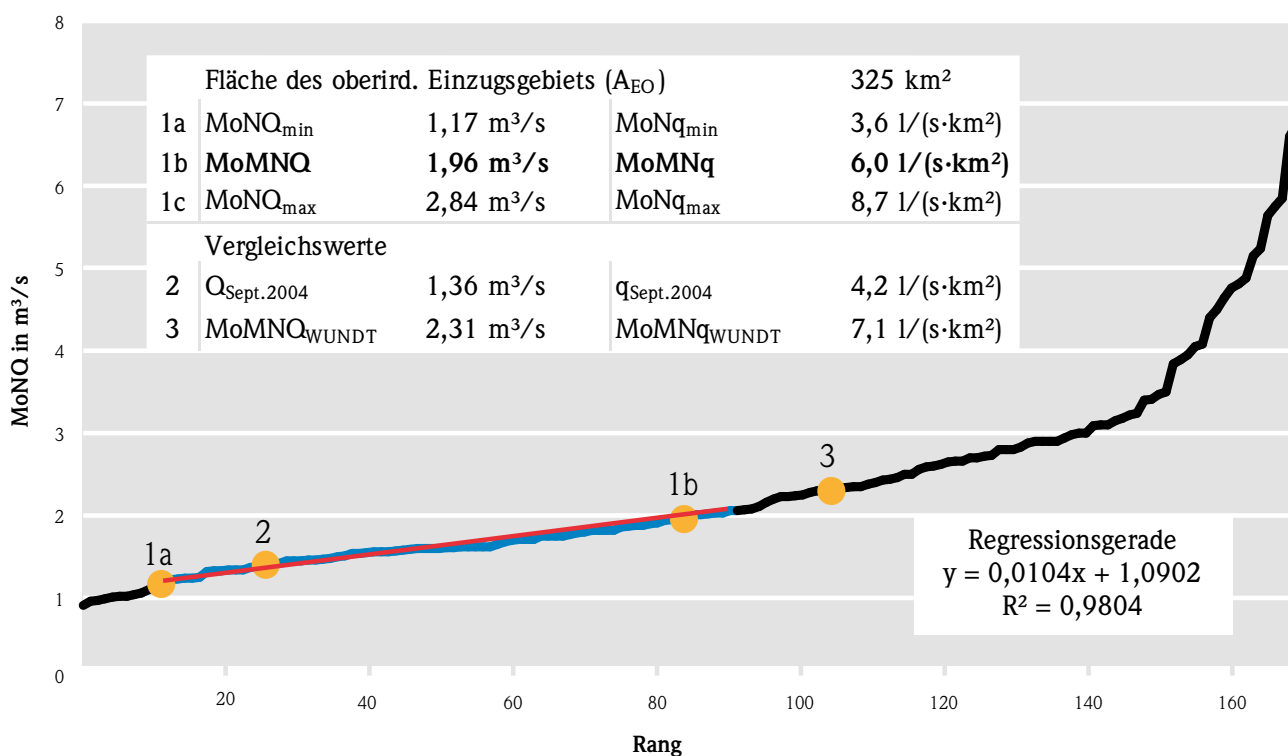


Abb. 5.5: Auswertung des langjährigen mittleren Niedrigwasserabflusses nach DEMUTH. Abflusspegel Hainstadt (247 41 303), Buntsandstein-Odenwald

## Erläuterung zur Darstellung der DEMUTH-Auswertungen

### $y = mx + b$

Gleichung der DEMUTH-Regressionsgeraden

Alle Abflüsse oberhalb der Regressionsgeraden enthalten Oberflächenwasser und Zwischenabfluss, alle Abflüsse unterhalb der Regressionsgeraden werden aus dem Grundwasser gespeist.

Die Regressionsgerade beginnt bei 5 % der Abflusswerte und endet frühestens bei Erreichung von 50 % der Abflusswerte bzw. beim Korrelationskoeffizient-Maximum ( $R^2 = \max.$ ).

### MoMNQ

Monatliche Niedrigwasserabflüsse  
(langjährige Werte-Reihe)

### Rang

Anzahl der monatlichen Niedrigwasser-Abflusswerte

### Pos. 1a

5 %-Kriterium zur Abtrennung von anthropogenen Einflüssen, entspricht dem Mindest-Basisabfluss nach DEMUTH

### Pos. 1b

Langjähriger Mittlerer Basisabfluss  
(= DEMUTH-Basisabfluss)

### Pos. 2

Im September 2004 gemessener Abfluss

### Pos. 3

Langjähriger Mittlerer Basisabfluss nach WUNDT

## Vergleich der Auswertemethoden

In Tab. 5.3 werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertemethoden zur Bestimmung der

Grundwasserneubildungsspende aus den Niedrigwasserabflüssen gegenübergestellt.

**Tab. 5.3:** Methodenvergleich zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsspende

Bezeichnung	Pegel-Nr.	$A_{EO}$	MoMNQ <sub>Demuth</sub>		MoMNQ <sub>Wundt</sub>		Trockenwetterabfluss	
			Einheit	km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	%*	l/s·km <sup>2</sup>	%*
<b>Kristalliner Odenwald</b>								
Bensheim	239 50 104	26,8	6,3	100	6,5	103	3,0	48
Fahrenbach	239 40 359	45,1	5,5	100	6,4	116	2,9	53
Groß-Bieberau 1	247 61 050	151,0	4,8	100	5,7	119	3,4	71
Eberstadt	239 60 709	90,6	5,2	100	5,3	102	2,3	44
<b>Buntsandstein-Odenwald</b>								
Hainstadt	247 41 303	325,0	6,0	100	7,1	118	4,2	70

\* Die Grundwasserneubildungsspenden nach DEMUTH wurden als Referenzwerte zum Vergleich mit den anderen Auswertemethoden auf 100 % gesetzt.

Die Auswertung der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMNO) nach DEMUTH ergab für die Pegel des Kristallinen Odenwaldes Grundwasserneubildungsspenden zwischen 4,8–6,3 l/(s·km<sup>2</sup>). Für den Pegel Hainstadt (247 41 303) des Buntsandstein-Odenwaldes ergibt sich eine Grundwasserneubildungsspende in Höhe von 6,0 l/(s·km<sup>2</sup>).

Der Vergleich der drei unterschiedlichen Auswertemethoden (DEMUTH, WUNDT, Trockenwetterabflussmessungen) zeigt, dass die Berechnung des langjährigen mittleren Basisabflusses nach WUNDT (1958) erwartungsgemäß eine zu optimistische Einschätzung der Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten der beobachteten Pegel ergibt. Die auf der WUNDT-Methode basierenden Grundwasserneubildungsspenden fallen gegenüber den Ergebnissen der DEMUTH-Auswertung im Kristallinen Odenwald 2–19 % höher aus. Für den Pegel Hainstadt (247 41 303) im Buntsandstein-Odenwald liegt die Abweichung bei +18 %.

Dagegen liegen die im September 2004 durchgeführten Trockenwetterabflussmessungen deutlich unter dem langjährigen mittleren Basisabfluss nach DEMUTH. Die auf Stichtagsmessungen beruhenden Grundwasserneubildungsspenden fallen gegenüber

den DEMUTH-Werten für die Pegel des Kristallinen Odenwaldes 29–56 % geringer aus. Für die im Buntsandstein-Odenwald gelegene Einzugsgebietsfläche des Pegels Hainstadt (247 41 303) ergeben die Trockenwetterabflussmessungen eine 30 % niedrigere Grundwasserneubildungsspende.

Da im Teilraum Sprendlinger Horst keine Messstellen für eine kontinuierliche Überwachung von Fließgewässern vorhanden sind und aus den einmaligen Abflussmessungen vom September 2004 auf Grund des Trockenfallens vieler kleiner Fließgewässer keine verwertbaren Niedrigwasserabflüsse in diesem Gebiet ermittelt werden konnten, liegen für diesen Teil des Bearbeitungsgebietes keine auf Niedrigwasserabflussmessungen beruhenden Erkenntnisse über die Grundwasserneubildung vor. Die für die Einzugsgebiete der fünf permanenten Gewässerpegel ermittelten langjährig mittleren Grundwasserneubildungsspenden (Tab. 5.3) decken nur rund 40 % des Bearbeitungsgebietes ab. Um flächenhafte und flächendifferenzierte Aussagen über den Wasserhaushalt und die Grundwasserneubildung des gesamten Bearbeitungsgebietes treffen zu können, wird im folgenden Kapitel die Anwendung eines modellgestützten Verfahrens zur Ermittlung der Wasserbilanzgrößen vorgestellt.

### 5.1.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung

In Hessen kommt für die Modellierung der Grundwasserneubildung ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz, bei dem das Einschnitt-Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (Arbeitskreis KLIWA 2012;

MORHARD 2012) mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (HERGESELL & BERTHOLD 2005) gekoppelt wird (Abb. 5.6).

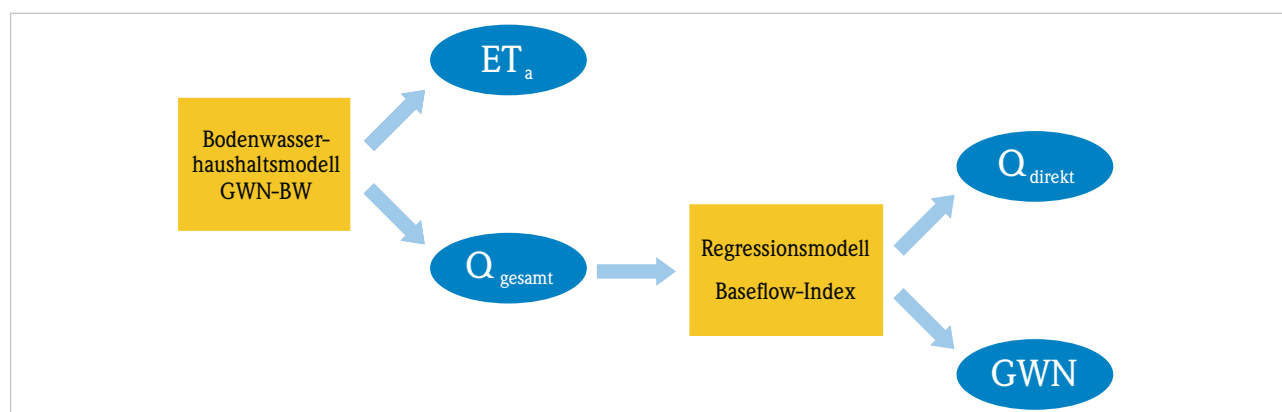


Abb. 5.6: Konzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Im ersten Verfahrensschritt wird mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW zunächst die tatsächliche Verdunstung ermittelt. Der für den zweiten Verfahrensschritt benötigte Gesamtabfluss ergibt sich aus der Differenz aus Niederschlag und simulierter tatsächlicher Verdunstung. Im zweiten Verfahrensschritt wird der Gesamtabfluss unter Verwendung von dem auf Basis von Abflussmessungen regressionsanalytisch ermittelten und regionalisierten

Baseflow-Index (BFI) in die schnellen lateralen Direktabflussanteile und den Basisabfluss, der der Grundwasserneubildung entspricht, separiert.

Vergleichbare Verfahren werden im Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2003) und in den KLIWA-Partnerländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz angewendet.

### 5.1.2.1 Beschreibung des Bodenwasserhaushaltsmodells

GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge (MORHARD 2012). In den einzelnen Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Beschreibung der an den Vorgängen von Verdunstung und Sickerwasser-

bildung beteiligten Prozesse zur Anwendung (Abb. 5.7). Die Berechnung erfolgt auf Basis von Tagesschritten, die räumliche Diskretisierung erfolgt durch ein zugrunde gelegtes 100 m Raster. Die berechnete Sickerwasserrate entspricht in Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. in den meist ebenen Porengrundwasserleitern) der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.

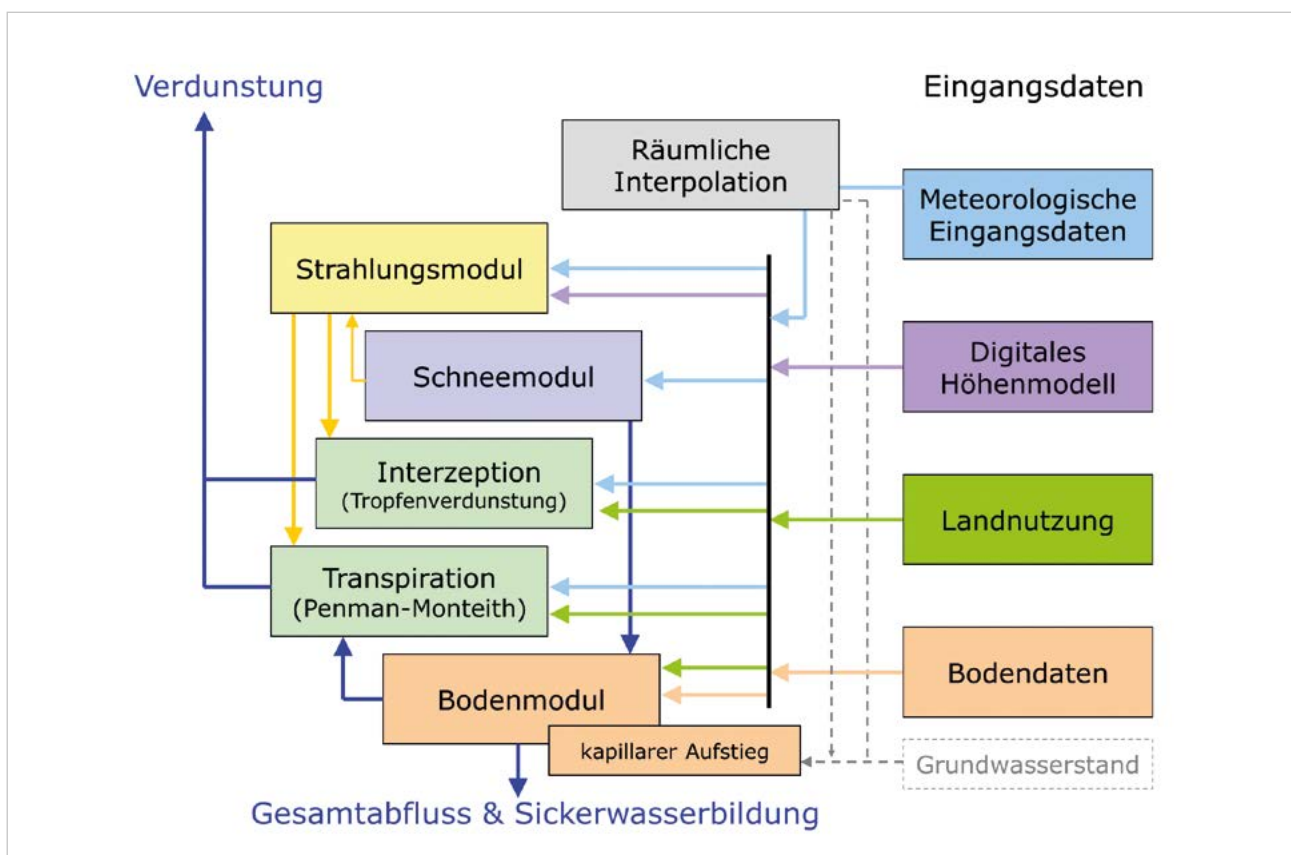


Abb. 5.7: Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten



Im Strahlungsmodul wird unter Berücksichtigung topographischer und astronomischer Gegebenheiten das nutzbare Energieangebot berechnet. Im Schneemodul werden Schneedeckenaufbau und Schneeschmelze (Temperatur-Index-Verfahren) einschließlich der Speicherung und des Wiedergefrierens von flüssigen Anteilen simuliert. Das Interzeptionsmodul beschreibt die Interzeption von Niederschlagswasser in mehreren Schichten der Vegetationsbedeckung und auf versiegelten Flächen. Die Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher erfolgt entsprechend der bestandesinneren Variation der meteorologischen Zustandsgrößen aus jeder Vegetationsschicht mit unterschiedlicher Intensität. Im Transpirationsmodul werden mehrere Verfahren zur Berechnung der Pflanzenverdunstung angeboten, darunter insbesondere zwei auf dem Ansatz nach Penman-Monteith basierende Varianten.

Bei der Methode aus dem Verdunstungsmodell TRAIN (MENZEL 1999) wird der effektive Bestandeswiderstand in Abhängigkeit von Blattflächenindex, Bodenfeuchtedefizit und Lufttemperatur ermittelt. Demgegenüber berücksichtigt der weiterentwickelte, modelleigene Ansatz die Einflüsse von Bedeckungsgrad (Pflanzen- bzw. Bodenverdunstung) und Bodenfeuchte in separaten Schritten, wobei sich die Parametrisierung von landnutzungsabhängigen Parametern wie minimalem Bestandeswiderstand oder Blattflächenindex an phänologischen Entwicklungsstadien orientiert, deren Eintrittszeitpunkte auch witterungsabhängig berechnet werden können. Das Bodenmodul zur Simulation der Auffüllung (durch Niederschlags- und Schneeschmelzwasser) und Entleerung (durch Transpiration und Perkolation) des Bodenspeichers wurde dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV

entlehnt. Aufgrund seines konzeptionellen Charakters ist es auch für größere Untersuchungsräume auf einer Datengrundlage in kleinem Kartenmaßstab zu parametrisieren. Für Flächen mit hohem Grundwasserstand kann der kapillare Aufstieg entsprechend den Angaben der bodenkundlichen Kartieranleitung abgeschätzt werden.

Für die Simulation des Bodenwasserhaushalts gehen als meteorologische Eingangsdaten Tageswerte der Referenzperiode von 1971–2000 für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke ein. Bis auf den Niederschlag wurden hierzu Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die mit GWN-BW räumlich interpoliert wurden. Bei den Niederschlagsdaten wurde auf die vom DWD regionalisierten REGNIE-Rasterdaten zurückgegriffen. Die für die Strahlungsberechnung benötigten Parameter Hangneigung und Exposition wurden aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet werden. Als Landnutzung wurden ATKIS-Daten verwendet, die in 16 simulationsrelevante Nutzungsklassen klassifiziert wurden.

Die wichtigste Kenngröße zur Simulation des Bodenwasserhaushalts ist die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums ( $nFKWe$ ). Diese wurde auf Grundlage der Bodenflächendaten Hessen im Maßstab 1 : 50 000 aus der nutzungsspezifischen Durchwurzelungstiefe, dem Bodensubstrat und dessen Gründigkeit abgeleitet. Sie stellt den entleer- bzw. auffüllbaren Bodenspeicher dar. Darüber hinaus wurden Angaben zu Substrat, Gründigkeit und mittlerem Grundwasserflurabstand benötigt, um den kapillaren Aufstieg zu berücksichtigen.

### 5.1.2.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung

Im Bereich von Festgesteinsgebieten mit mehr oder weniger ausgeprägtem Relief kann die mit GWN-BW berechnete Sickerwasserbildung bzw. der Gesamtabfluss nicht direkt mit der Grundwasserneubildung gleichgesetzt werden, da ein Teil des gebildeten Sickerwassers in schnelle laterale Abflusskomponenten transformiert wird. Daher wird in reliefierten Festgesteinsgebieten, zu denen auch der Odenwald zählt, der Gesamtabfluss ( $Q_{gesamt}$ ) mit Hilfe des Baseflow-Index (BFI) in die Abflusskomponenten

Direktabfluss ( $Q_{direkt}$ ) und Basisabfluss ( $Q_{basis}$ ) bzw. Grundwasserneubildung aufgeteilt. Der Baseflow-Index (BFI) beschreibt den Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss. Der BFI nimmt per Definition Werte zwischen 0 und 1 an. In Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. quartären Porengrundwasserleitern) liegt er bei 1, in reliefierten Festgesteinsgebieten nimmt er dagegen Werte kleiner 1 an.

Die Grundwasserneubildung wird durch die Multiplikation des Reduktionsfaktors BFI mit dem Gesamtabfluss berechnet. Somit kann die Grundwasserneubildung als relativer Anteil am Gesamtabfluss ausgedrückt werden:

$$\text{GWN} = Q_{\text{gesamt}} \cdot \text{BFI}$$

mit  $\text{BFI} = Q_{\text{basis}} / Q_{\text{gesamt}} = \text{MoMNO} / \text{MQ}$

Für die flächenhafte Anwendung des BFI-Ansatzes in Hessen wurde für eine Auswahl von 52 Pegelinzugsgebieten zunächst BFI-Werte auf der Grundlage von langjährigen Abflussmessungen der Periode 1971–2000 ermittelt. Als Referenzgröße für den Basisabfluss wurden die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNO) nach KILLE (1970) aus Pegeldaten abgeleitet. Diese wurde dann zu den mittleren Abflüssen (MQ) in Relation gesetzt.

Durch multiple lineare Regressionsanalyse wurde dann der statistische Zusammenhang zwischen den BFI-Werten der 52 Einzugsgebiete und einer Auswahl abflussrelevanter Gebietsmerkmale in Form einer Übertragungsfunktion ermittelt (HERGESELL & BERTHOLD 2005). Die in der resultierenden Regres-

sionsgleichung einfließenden Gebietsparameter sind in Tab. 5.4 zusammengestellt.

**Tab. 5.4:** Abflussrelevante Gebietsparameter des BFI-Regressionsmodells

Signifikante Parameter
Niederschlag
Verhältnis Sommer-/Winterniederschlag
Gebietshöhe
Landnutzung Acker
Landnutzung Grünland
Landnutzung Wald
nFK100
$k_f$ -Wert der Böden
Gewässernetzdichte
$k_f$ -Wert des oberen Grundwasserleiters

Mit Hilfe der gewonnenen Übertragungsfunktion (Regressionsgleichung) wurden abschließend die BFI-Werte für die gesamte Fläche Hessens regionalisiert, sodass diese auch für den Odenwald flächendifferenziert im 100 m Raster vorliegen.

### 5.1.2.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsmodellierung beschrieben. Die flächendifferenziert vorliegenden Modellergebnisse wurden für die drei hydrogeologischen Teilräume sowie das gesamte Bearbeitungsgebiet ausgewertet.

Die aggregierten Gebietsmittelwerte der Wasserhaushaltsgrößen für die Referenzperiode 1971–2000 sind in Tab. 5.5 aufgeführt. Die räumliche Verteilung der Wasserhaushaltsgrößen ist in Abb. 5.8 bis Abb. 5.12 dargestellt.

**Tab. 5.5:** Langjährig mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen im Bearbeitungsgebiet

Referenzperiode 1971–2000	Niederschlag	Tatsächliche Verdunstung	Gesamtabfluss	Direktabfluss	Grundwasserneubildung
Einheit	mm/a	mm/a	mm/a	mm/a	mm/a / $1/(s \cdot \text{km}^2)$
Kristalliner Odenwald	981	654	327	159	168/5,3
Buntsandstein-Odenwald	1051	705	346	164	183/5,8
Sprendlinger Horst	780	635	145	84	60/1,9
<b>Bearbeitungsgebiet (Gesamtfläche)</b>	<b>994</b>	<b>675</b>	<b>319</b>	<b>154</b>	<b>146/4,6</b>

Der Niederschlag ist als einzige positive Bilanzgröße die wichtigste Steuergröße für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung bzw. die Ermittlung der Grundwasserneubildung. Der Niederschlag repräsentiert das Wasserdargebot, welches maximal für alle übrigen Prozesse zur Verfügung steht. Bei den verwendeten Niederschlagsdaten handelt es sich um korrigierte Niederschlagshöhen, bei denen der systematische Messfehler nach RICHTER (1995) korrigiert wurde. Die in Abb. 5.8 dargestellte Niederschlagsverteilung folgt im Wesentlichen der topographischen Struktur des Bearbeitungsgebietes und weist einen deutlichen Nord-Süd-Gradienten auf. Die höchsten Niederschläge mit bis zu 1.250 mm/a treten in den Höhenlagen des Kristallinen Odenwaldes und des Buntsandstein-Odenwaldes auf, die geringsten Niederschläge (700–750 mm/a) fallen in den Niederungen an der nördlichen Begrenzung des Bearbeitungsgebietes. Mit rund 1.000 mm/a liegt der gemittelte Niederschlag im gesamten Bearbeitungsgebiet deutlich oberhalb des mittleren Niederschlags von Hessen (845 mm/a).

Die tatsächliche Verdunstung ist die zentrale Ergebnisgröße der Bodenwasserhaushaltsmodellierung und die wichtigste Verlustgröße der Wasserbilanz. Sie ist vor allem von Temperatur, Niederschlagsdargebot, Bodeneigenschaften, Landnutzung und Relief abhängig und von entscheidender Bedeutung für die Höhe und jahreszeitliche Verteilung der verschiedenen Abflusskomponenten. Die Verdunstung kann regional einen sehr unterschiedlichen Anteil an der Niederschlagshöhe ausmachen. In Hessen verdunsten im vieljährigen Mittel rund 70 % des gefallenen Niederschlags, so dass damit etwa 30 % abflussrelevant werden.

Während im niederschlagsärmeren Sprendlinger Horst mehr als 80 % des Niederschlags wieder verdunstet, beträgt dieser Anteil im Kristallinen Odenwald und Buntsandstein-Odenwald 67 %. Die absolute Verdunstungshöhe liegt in allen drei Teilräumen des Bearbeitungsgebietes oberhalb der mittleren Verdunstungshöhe von Hessen (589 mm/a). Bei der räumlichen Verteilung der tatsächlichen Verdunstung im Bearbeitungsgebiet (Abb. 5.9) fällt auf, dass diese in nicht bewaldeten, niederschlagsarmen Niederungen und Talauen deutlich geringer (400 mm/a) als in den bewaldeten Hochlagen ist (bis zu 900 mm/a). Das liegt daran, dass in den Niede-

rungen die Wasserverfügbarkeit für Verdunstungsprozesse geringer und der Verdunstungsanspruch bei Wäldern am höchsten ist. Mit abnehmendem Bodenwassergehalt nimmt die tatsächliche Verdunstung ab, ab einem kritischen Bodenwassergehalt findet diese nicht mehr statt.

Als Gesamtabflusshöhe wird der abflussrelevante Niederschlagsanteil bezeichnet. Er resultiert aus der Differenz aus Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung. Der Gesamtabfluss ist die Summe aller Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss) (siehe auch Abb. 5.1). Beeinflusst wird der Gesamtabfluss von allen Faktoren, die im Zusammenhang mit dem Niederschlag und der tatsächlichen Verdunstung genannt wurden. Die räumliche Verteilung des Gesamtabflusses (Abb. 5.10) resultiert folglich aus der Überlagerung der Verteilungsmuster des Niederschlags und der tatsächlichen Verdunstung. Am deutlichsten ist der Einfluss von Orographie und Landnutzung erkennbar. Der Gesamtabfluss zeichnet sich durch ein sehr breites Wertespektrum aus. Die mittleren Gesamtabflusshöhen des Kristallinen Odenwaldes und des Buntsandstein-Odenwaldes liegen deutlich oberhalb des mittleren Gesamtabflusses von Hessen (256 mm/a). Im Sprendlinger Horst dagegen fällt der Gesamtabfluss wegen der geringen Niederschläge und der hohen Verdunstung deutlich niedriger aus.

Während auf ebenen und gut durchlässigen Standorten der Gesamtabfluss näherungsweise der Grundwasserneubildung entspricht, kommt es in reliefierten und schlecht durchlässigen Gebieten zur Reduktion der Grundwasserneubildung durch Oberflächen- und Zwischenabfluss, die hier als Direktabfluss zusammengefasst werden. Dieser Teil des Gesamtabflusses gelangt unmittelbar bzw. mit einer geringen zeitlichen Verzögerung direkt in die Vorflut. In der Karte des Direktabflusses (Abb. 5.11) fallen besonders die versiegelten Flächen der Siedlungsbereiche auf, die durch hohe Direktabflussanteile charakterisiert sind. Der prozentuale Anteil des Direktabflusses am Gesamtabfluss ist im Sprendlinger Horst am größten, im Buntsandstein-Odenwald am geringsten. In den angrenzenden ebenen Gebieten des Hessischen Rieds und der Untermain-Ebene findet mit Ausnahme der versiegelten Flächen kein nennenswerter Direktabfluss statt.

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist die aus wasserwirtschaftlicher Sicht bedeutendste Wasserbilanzgröße und eine zentrale hydrogeologische Kenngröße dieser Untersuchung. Als Bilanzrest macht sie meist den kleinsten Anteil der Wasserbilanz aus.

Im Bearbeitungsgebiet weisen die Modellergebnisse für die Grundwasserneubildung eine sehr große Bandbreite auf. Während es im Spremlinger Horst Standorte ohne nennenswerte Grundwasserneubildung gibt, reichen die Werte in den Hochlagen des Kristallinen und des Buntsandstein-Odenwaldes bis über 400 mm/a.

Die mittlere Grundwasserneubildung liegt im Buntsandstein-Odenwald am höchsten, was sowohl auf die höchsten Niederschläge als auch das höhere nutzbare Wasserspeichervermögen gegenüber dem Kristallinen Odenwald und dem Spremlinger Horst zurückzuführen ist. Ebenso wie im Buntsandstein-Odenwald liegt auch im Kristallinen Odenwald

die Grundwasserneubildungshöhe deutlich über dem hessischen Mittelwert von 101 mm/a.

Der Spremlinger Horst zeichnet sich dagegen durch eine sehr niedrige Grundwasserneubildung aus. Hier wirken sich mehrere Faktoren mindernd auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag aus. Aus der geringsten Niederschlagshöhe und dem prozentual höchsten Verdunstungsanteil des Bearbeitungsgebietes resultiert zunächst ein sehr niedriger Gesamtabfluss, der infolge des höchsten Direktabflussanteils nochmals deutlich reduziert wird.

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag der Referenzperiode 1971–2000 ist in Abb. 5.12 dargestellt. Aufgrund der vielen Einflussgrößen erscheint das räumliche Verteilungsmuster der Grundwasserneubildung sehr heterogen. Während die Verteilung des Niederschlags großflächig erkennbar ist, treten regional andere Einflussgrößen, wie z. B. die Landnutzung, in den Vordergrund.

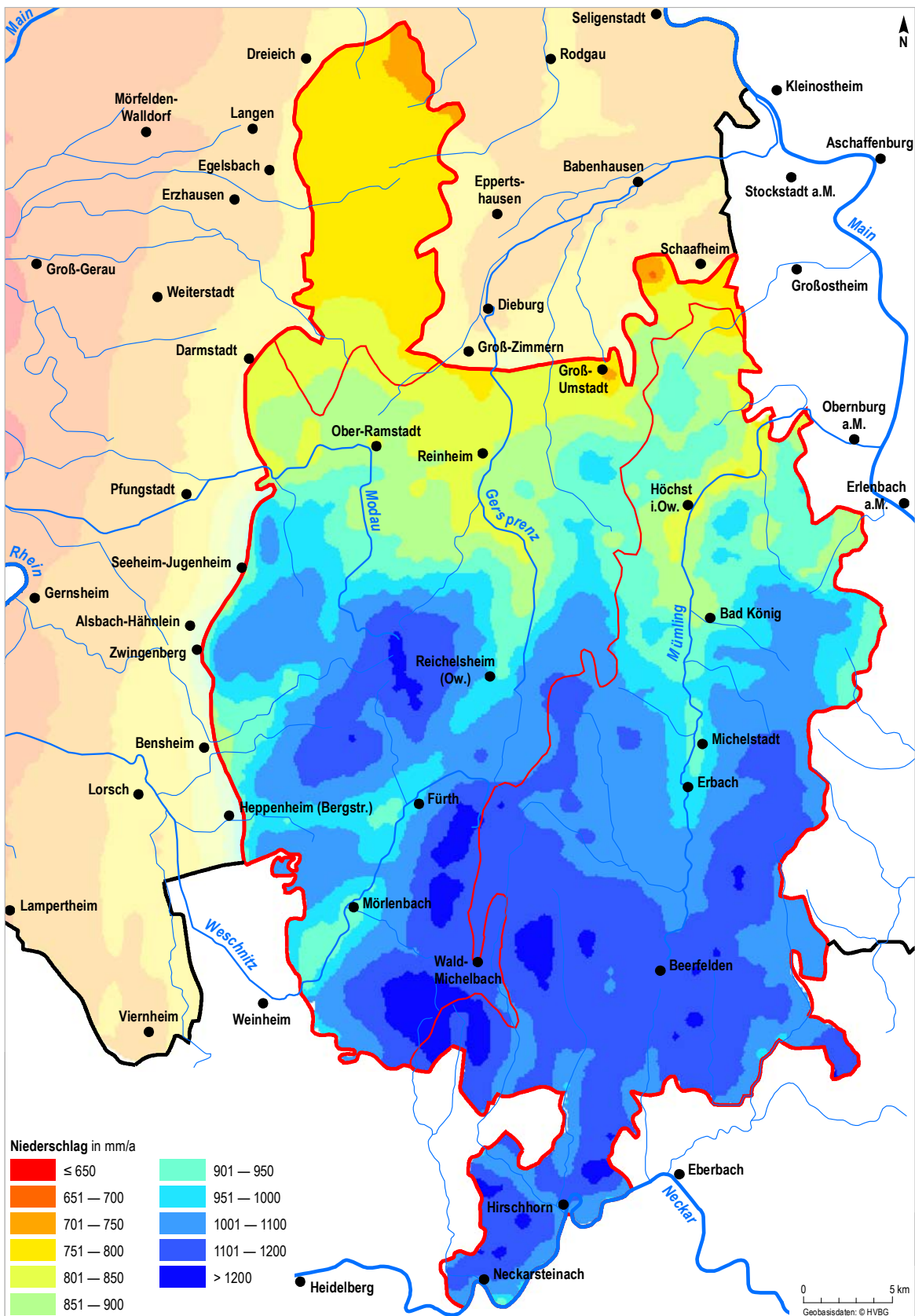


Abb. 5.8: Mittlerer jährlicher, korrigierter Niederschlag (1971–2000)

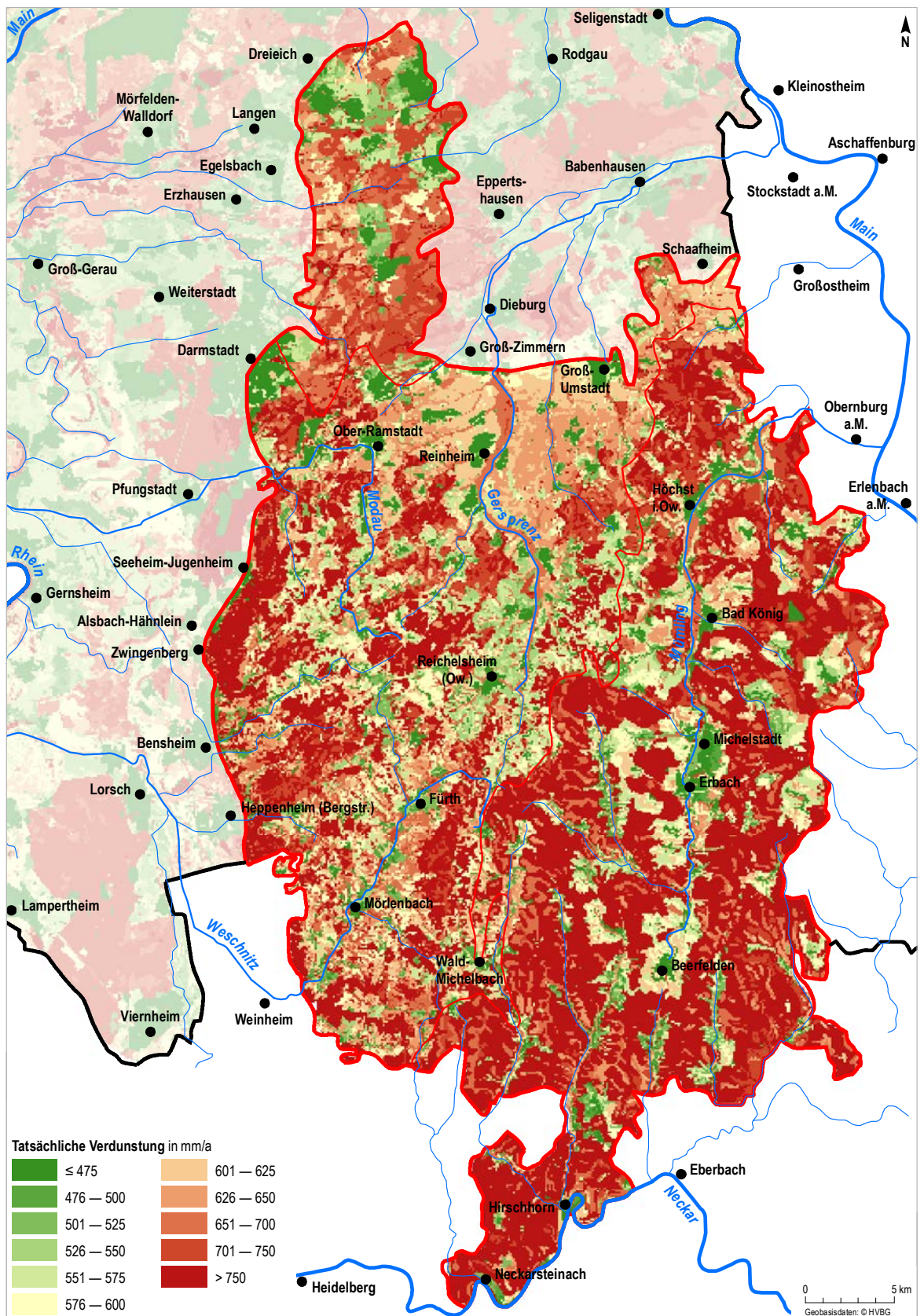


Abb. 5.9: Mittlere tatsächliche Verdunstung (1971–2000)

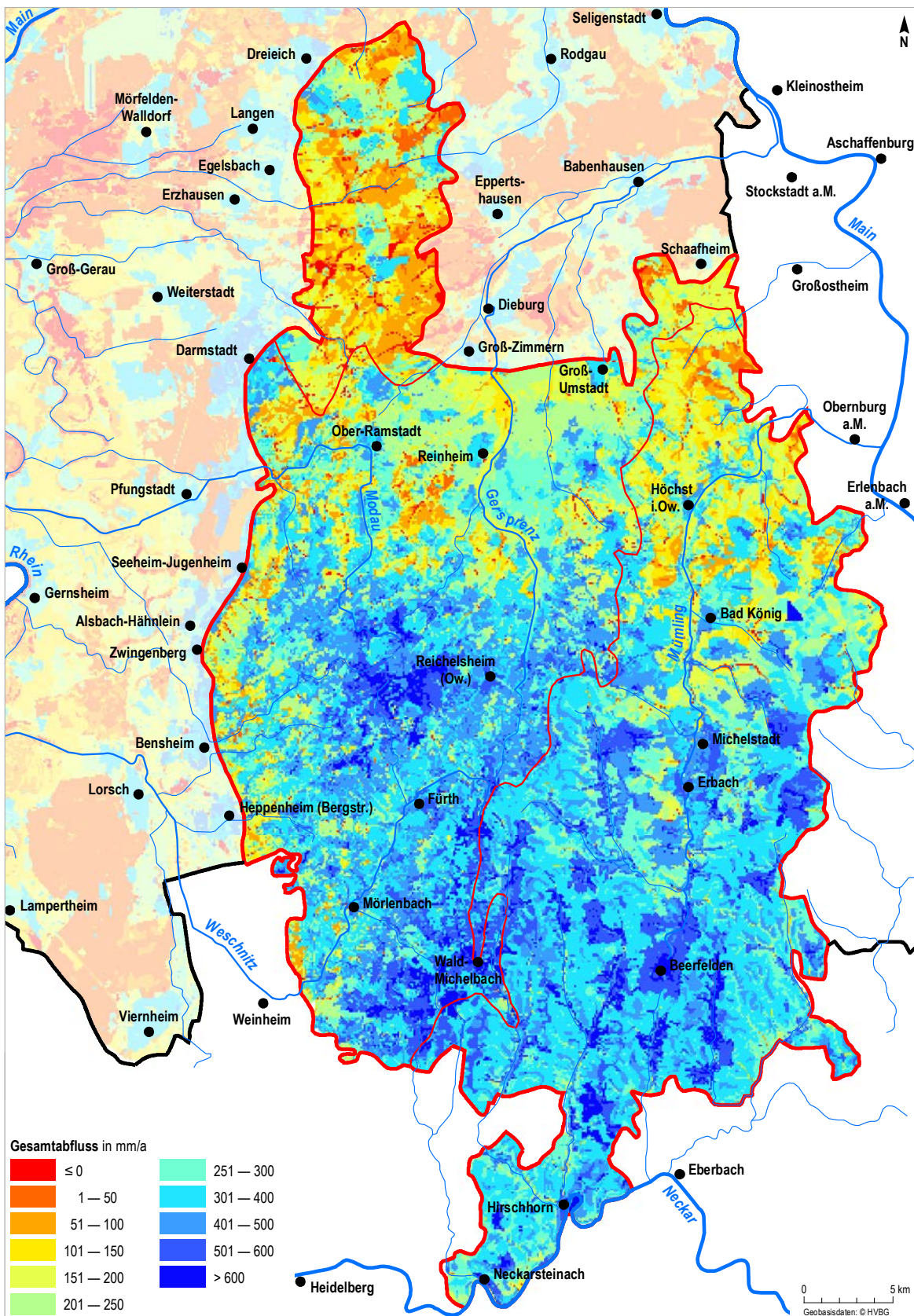


Abb. 5.10: Mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe (1971–2000)

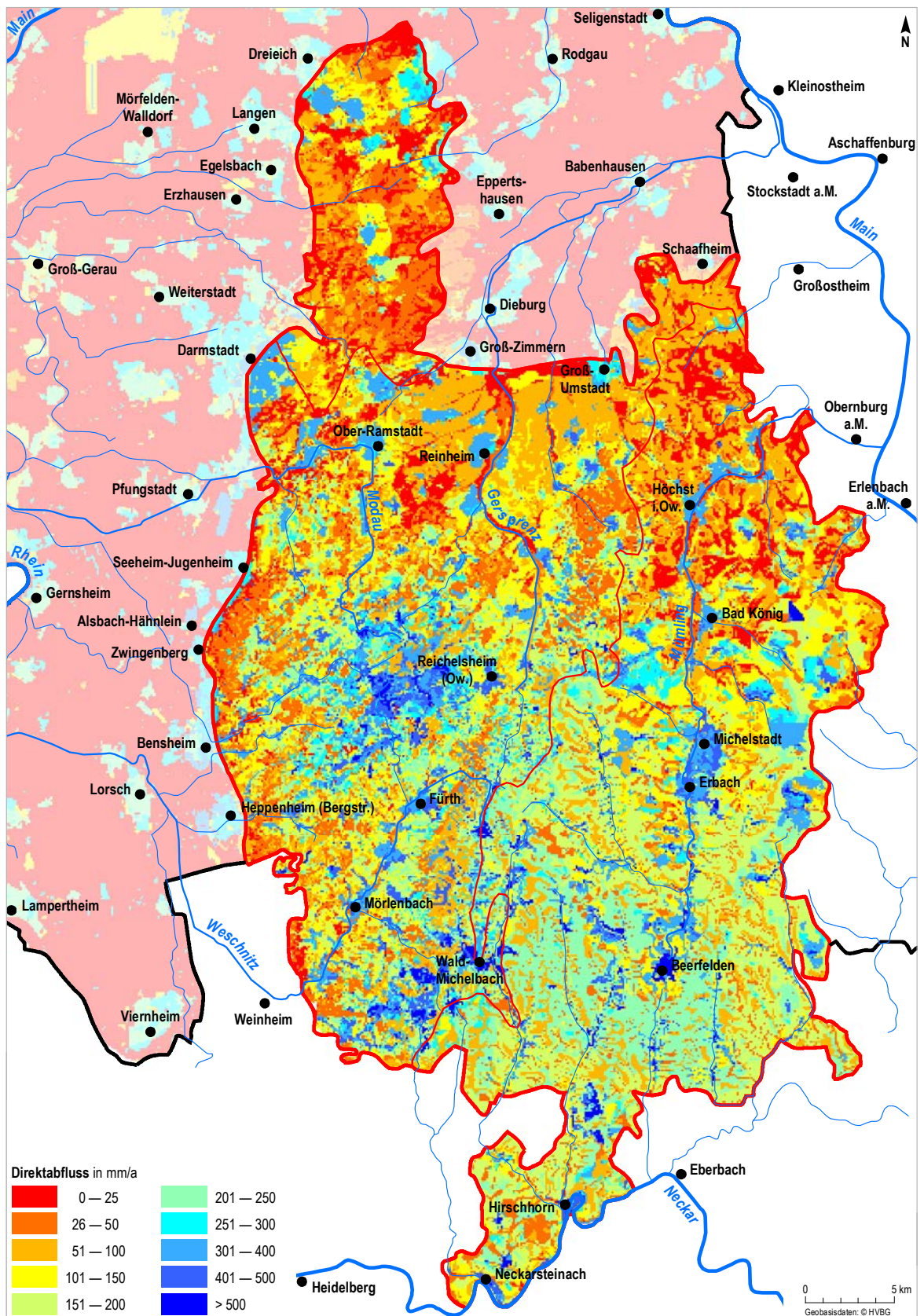


Abb. 5.11: Mittlere jährliche Direktabflusshöhe (1971–2000)



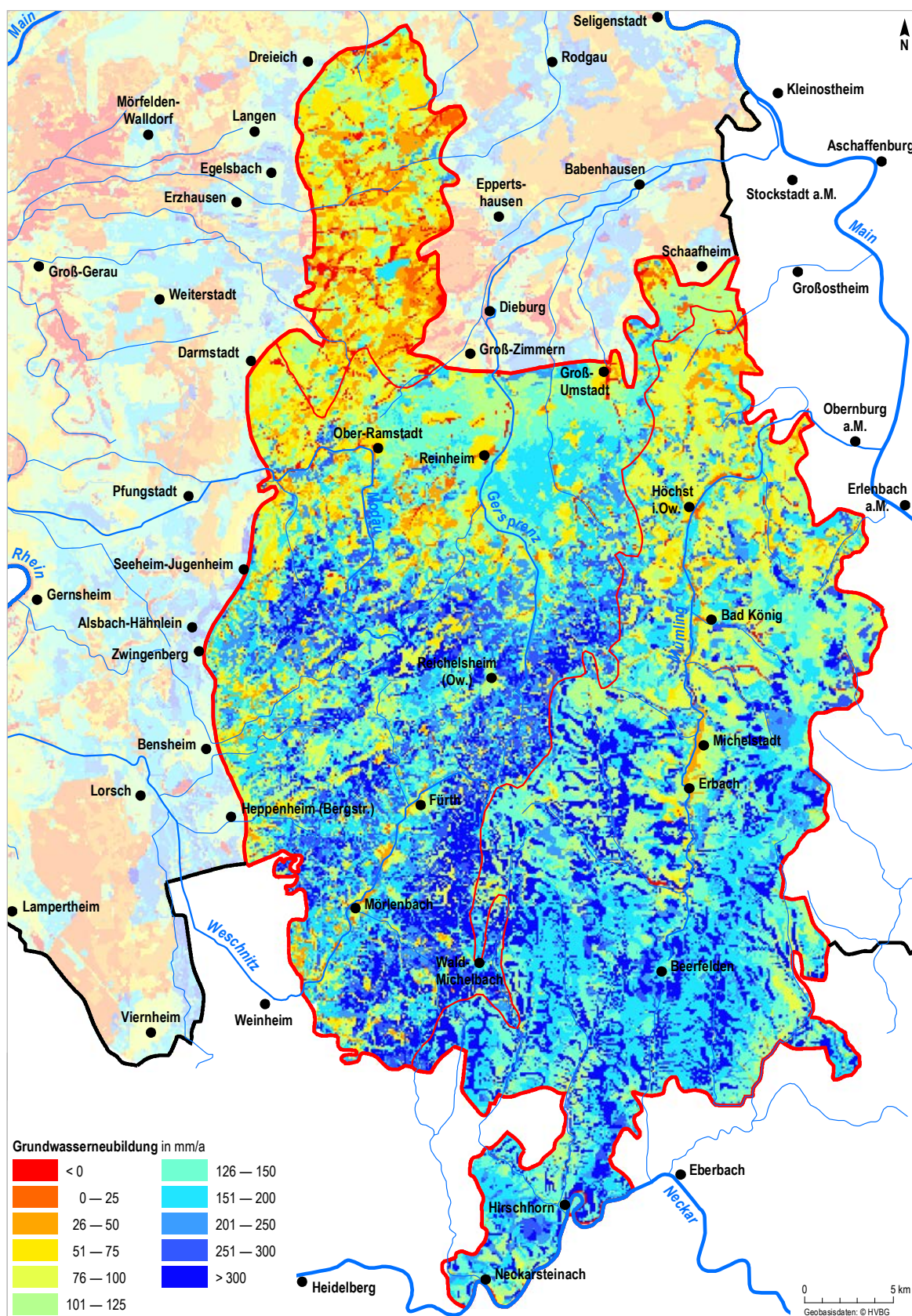


Abb. 5.12: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971–2000)

### 5.1.3 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die mit dem beschriebenen Modell ermittelten langjährig mittleren Grundwasserneubildungsspenden stimmen für den Kristallinen Odenwald und Buntsandstein-Odenwald gut mit den Niedrigwasserabflüssen nach DEMUTH überein, obwohl der langjährige Betrachtungszeitraum nicht exakt identisch ist. Dagegen fielen die auf einmaligen Trockenwetterabflussmessungen beruhenden Grundwasserneubildungsspenden deutlich geringer aus. Die geringen Werte der Trockenwetterabflussmessungen sind auf das schnelle Leerlaufen des geringmächtigen Umsatzraumes zurückzuführen. Auch wegen des gebietsweisen Trockenfallens von Gewässerabschnitten eignen sich die Trockenwetterabflussmessungen im Bearbeitungsgebiet nur bedingt zur Abschätzung der Grundwasserneubildung (siehe Kapitel 5.1.1.1).

Dies zeigt, wie wichtig es ist, berechnete Grundwasserneubildungsraten kritisch zu betrachten und möglichst verschiedene Berechnungsverfahren zur Anwendung zu bringen. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist nicht nur von dem gewählten Verfahren, sondern auch von der Qualität der Eingangsdaten bzw. Fehlern bei der Datenermittlung abhängig. Bei aller noch so sorgfältigen und genauen Erfassung der für die Berechnung notwendigen Parameter ist die Genauigkeit der Ergebnisse begrenzt. Dafür sind die geologischen und meteorologischen Inhomogenitäten häufig zu groß und nicht voll erfassbar (HÖLTING & COLDEWEY 2013). So beträgt z. B. die durch Messfehler bedingte Abweichung der Niederschlagshöhe bei freier Stationslage in den Wintermonaten teilweise über 30 % (RICHTER 1995). Aber auch die anderen Eingangsdaten, z. B. Landnutzung, nutzbare Feldkapazität, kapillarer Aufstieg oder tatsächliche Evapotranspiration, sind mit Unsicherheiten behaftet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse müssen außer anthropogenen Einflüssen, wie beispielsweise Grundwasserentnahmen, Abwassereinleitungen, Talperrren und andere den Abfluss regulierende Einflüsse, zusätzliche lokale hydrogeologische Einflüsse berücksichtigt werden. Die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate aus dem Abfluss in Vorflutern setzt voraus, dass das Grundwassereinzugsgebiet eines Pegels mit dem oberirdischen Einzugsgebiet (Niederschlagsgebiet) näherungsweise übereinstimmt. Dies ist aber nicht immer der Fall. Abweichungen von

Einzugsgebieten und Grundwasserscheiden fallen besonders bei kleinen und langgestreckten Einzugsgebieten ins Gewicht. Nicht selten kommt es im Streichen von Störungszonen oder durch geneigte Schichtlagerung zu Verschiebungen der Grundwasserscheide. Häufig ist ein Einzugsgebiet im Festgestein nicht genau abgrenzbar, insbesondere wenn mehrere Grundwasserstockwerke zum Abfluss beitragen.

Hinsichtlich des Prozessverständnisses ist zu beachten, dass die ermittelten Grundwasserneubildungsspenden in der Regel nicht mit dem nutzbaren Grundwasserangebot gleichzusetzen sind. Die Grundwasserneubildung begrenzt das nutzbare Grundwasserangebot nach oben und stellt somit das maximal mögliche oder potentielle Dargebot dar. Meist fällt das nutzbare Grundwasserangebot aber erheblich kleiner als die Grundwasserneubildung aus. Die Ergiebigkeit des Grundwasservorkommens und die Zeitskala, auf der der Grundwasserumsatz im Grundwasserleiter erfolgt, sind für die Grundwasserneubildung nicht maßgeblich, für das genutzte Dargebot dagegen sehr wohl.

Deshalb besteht auch kein Widerspruch darin, dass der Odenwald ein niederschlagsreiches Gebiet mit hoher Grundwasserneubildung ist, und gleichzeitig über ein vergleichsweise geringes Grundwasserangebot verfügt. Bis zur Errichtung der ersten zentralen Wasserversorgung um das Jahr 1900 hatten die auf den Buntsandstein-Hochflächen siedelnden Menschen immer wieder mit Wassermangel zu kämpfen. Der Geopark-Pfad Rothenberg im Geo-Naturpark Bergstraße-Odenwald befasst sich explizit mit dem Thema „Wasserarmut in einem regenreichen Gebiet“.

Der Unterschied zwischen Grundwasserneubildung aus Niederschlag und Grundwasserangebot ist im Kristallinen Odenwald am größten. Von der für diesen Teilraum ermittelten, relativ hohen Grundwasserneubildungsspende ( $5,3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ) kommt nur ein kleiner Teil ( $0,5\text{--}1 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ) im gering bis äußerst gering durchlässigen kristallinen Festgestein an. In Bereichen tief vergrusteter Metamorphite liegt dieser Neubildungsanteil etwas höher ( $1\text{--}3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ). Das kristalline Grundgebirge hat aufgrund seines sehr geringen nutzbaren Hohlraumvolumens nur eine sehr geringe praktische Bedeutung als Grundwasserleiter. Ein Großteil des versickernden Niederschlags gelangt, ohne das Grundgebirge zu errei-

chen, als Zwischenabfluss mit nur geringer zeitlicher Verzögerung wieder in die Vorflut. Diese lateralen, oberflächennahen Abflusskomponenten bewegen sich überwiegend im Verwitterungsbereich (Hangschutt, Gesteinsschutt, meist nur wenige Meter mächtig). Nur in Bereichen flächenhaft ausgeprägter Grus-Ablagerungen (bis zu 30 m mächtig) und in den quartären fluviatilen Lockersedimente der Flusstäler sind Poren-Grundwasserleiter von mittlerer bis mäßiger hydraulischer Durchlässigkeit entwickelt.

## 5.2 Hydrogeologische Teilräume

### 5.2.1 Kristalliner Odenwald

Der Festgesteins-Grundwasserleiter des Kristallins besitzt überwiegend geringe bis äußerst geringe hydraulische Durchlässigkeiten. In den massigen Gesteinen sind meist nur in einer oberflächennahen Entspannungszone von wenigen Zehnermetern Tiefe wasserwegsame Klüfte vorhanden. Zur Tiefe nimmt die Kluftweite und -dichte rasch ab. Deshalb ist im kristallinen Grundgebirge nur im oberflächennahen Bereich mit einem geringen nutzbaren Hohlraumvolumen zu rechnen.

Über dem Festgestein ist eine Verwitterungsschicht in Form einer Vergrusungszone ausgebildet, in der ein Lockergesteins-Grundwasserleiter (Porengrundwasserleiter) von mittlerer bis mäßiger hydraulischer Durchlässigkeit ausgebildet sein kann. Das Grundwasser bewegt sich in diesem meist nur wenige Meter mächtigen Verwitterungsbereich hangabwärts. Diese Vergrusungszone stellt den wesentlichen Grundwasserleiter im Kristallinen Odenwald dar, der zum überwiegenden Teil die Wasserversorgung sichert.

Porengrundwasserleiter sind ebenfalls in Flusstälern innerhalb der quartären fluviatilen Lockersedimente

### 5.2.2 Buntsandstein-Odenwald

Die Sedimente des Perms und der Trias lagern diskordant auf dem kristallinen Grundgebirge. Aus der Trias liegen vor allem Sedimente des Buntsandsteins vor, nur im Michelstädter Graben sind mergelige Kalksteine des Muschelkalks erhalten geblieben.

Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass trotz Anwendung des MotMNOQ-Verfahrens nach DEMUTH bzw. KILLE, welches zur Ermittlung des mittleren Grundwasserabflusses in Gebieten mit hohem Zwischenabfluss empfohlen wird, die für den Kristallin- und Buntsandstein-Odenwald ermittelten langjährigen Niedrigwasserabflussspenden immer noch einen beträchtlichen Anteil an Zwischenabfluss beinhalten müssen.

ausgebildet. In den Flusstälern fließt das Grundwasser entweder aus den Klüften des Kristallins dem Porengrundwasserleiter zu oder tritt aus dem Hangschutt und Gesteinsgrus über. Untergeordnet wird es bei fehlendem Auenlehm auch durch versickernde Niederschläge erneuert.

Die Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers ist bei geringmächtiger Verwitterungsschicht als mittel und mit zunehmender Mächtigkeit von Grussschicht oder Lösslehm-Überlagerung als mittel bis gering einzustufen. Wasserwirtschaftlich ist der kristalline Grundwasserleiter als wenig bedeutend einzustufen. Die Wassergewinnung beschränkt sich im Kristallinen Odenwald i. d. R. auf Quelfassungen sowie auf Flachbrunnen in den Talauen.

Die Vorfluter für den westlichen Bereich des Kristallins sind neben dem Main und dem Rhein die Modau und der Winkelbach. Der südliche Kristalline Odenwald wird nach Südosten von der Weschnitz entwässert. Der östliche Kristalline Odenwald wird von der Gersprenz nach Norden entwässert.

Im Westen des Buntsandstein-Odenwaldes stehen in einem schmalen Streifen entlang des Ausstrichs zum kristallinen Grundgebirge Brekzien, Konglomerate, Mergelsteine, Karbonatsteine und Tonschluffsteine des Rotliegend und Zechsteins an. Sie erreichen

eine Mächtigkeit von 15–50 m und unterlagern die Schichten des Buntsandsteins. Im Zechsteindolomit, wenige Meter über dem Grundgebirge, kann lokal ein karbonatischer Grundwasserleiter entwickelt sein.

Hauptgrundwasserleiter ist der Untere und Mittlere Buntsandstein. Im Oberen Buntsandstein können schwebende Grundwasserstockwerke vorhanden sein. In Flusstälern werden diese Kluftgrundwasserleiter von Porengrundwasserleitern in quartären fluviatilen Lockergesteinen mit mäßiger hydraulischer Durchlässigkeit überlagert.

Neben dem Neckar und dem Main ist die Mümling Hauptvorfluter im Buntsandstein-Odenwald. Sie entwässert diesen Bereich nahezu vollständig und mündet im Nordosten in den Main.

Der Verteilung von Störungen und Klüften in den Schichten des Buntsandsteins sowie deren hydraulische Anbindung führen häufig zu Fehlbohrungen.

Auch aus diesem Grund stützt sich die öffentliche Wassergewinnung überwiegend auf Quellen.

Der Buntsandstein-Grundwasserleiter weist als Kluftgrundwasserleiter eine mittlere bis hohe Durchlässigkeit auf. Hydraulische Kennwerte aus Pumpversuchen liegen bis auf wenige Ausnahmen nicht vor. Markierungsversuche im südöstlichen Odenwald haben Abstandsgeschwindigkeiten von mehr als 100 m/d ergeben. Der rasche Anstieg von Quellschüttungen nach Starkniederschlägen und die damit verbundene Trübungsneigung belegen ebenfalls eine hohe Kluftdurchlässigkeit.

Bei Überlagerung durch tonig-schluffige Schichten des Oberen Buntsandsteins (Röt) ist der unterlagernde Grundwasserleiter überwiegend gut geschützt. Häufig sind aber nur geringmächtiger Löss bzw. Fließerden vorhanden, die teilweise nur schlecht bis mäßig vor Verunreinigungen schützen.



**Abb. 5.13:** Grundwassermessstelle Schöllbach, Hesseneck

### 5.2.3 Sprendlinger Horst (Rotliegend)

Nordöstlich von Darmstadt wird das kristalline Grundgebirge von permischen Brekzien und Konglomeraten, Sandsteinen (Arkose), Tonsteinen sowie untergeordnet Kalksteinen und Vulkaniten überlagert. Darin ist ein Kluftgrundwasserleiter von nur geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit entwickelt. Klüfte sind überwiegend in den grobklastischen Festgesteinen (Brekzien, Konglomeraten und Sandsteinen) und Vulkaniten vorhanden. Das Rotliegend des Sprendlinger Horstes führt daher verhältnismäßig wenig Grundwasser. Von Ausnahmen abgesehen ist eine wirtschaftliche Erschließung kaum möglich. Das Hydrogencarbonat-Grundwasser ist aufgrund einzel-

ner Kalksteinbänke und quartärer Lösslehmdecken als ziemlich hart bis hart (12–18° dH) einzustufen. Geogen vorhandene erhöhte Arsen-Konzentrationen können zu Einschränkungen für die Wassergewinnung führen.

In der besser durchlässigen Auflockerungszone über dem Festgestein kann ein Grundwasserstockwerk ausgebildet sein, das dann lokal zur Brauchwassergewinnung genutzt werden kann. Insgesamt besitzt das Grundwasservorkommen im Bereich des Sprendlinger Horstes wasserwirtschaftlich eine geringe Bedeutung.

## 5.3 Bohrungen, Grundwassererschließung und Wasserförderung

Der hessische Odenwald und der Sprendlinger Horst sind durch eine Vielzahl von Bohrungen untersucht. Insgesamt standen im Oktober 2016 die Daten von 3.340 Bohrungen zur Verfügung, davon haben 55 % (1.838) eine Teufe von < 10 m und 45 % (1.502) eine Teufe von ≥ 10 m erreicht.

Im nördlichen Sprendlinger Horst liegt die bislang größte Bohrtiefe bei 522 m. Bei Groß-Umstadt, im nördlichen kristallinen Odenwald (Böllsteiner Odenwald), liegt die maximale Bohrtiefe bei 775 m.

Sprendlinger Horst: max. Teufe 522 m

Buntsandstein-Odenwald: max. Teufe 489,3 m

Kristalliner Odenwald

Bergsträßer Odenwald: max. Teufe 338 m

Böllsteiner Odenwald: max. Teufe 775 m

### 5.3.1 Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach“

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach“ der HEAG Südhesische Energie AG wurde vom hessischen Umweltministerium über Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert. Es sollte Grundlagen erarbeiten und demonstrieren, wie die Wärmeversorgung eines mittelständischen Industriebetriebes mit einer mitteltiefen koaxialen Erdwärmesonde ökonomisch unter Nutzung der regenerativen Energiequelle Erdwärme im Zusammenwirken mit einer energetisch besonders sparsamen Gebäudetechnik erfolgen kann. Damit erfüllte das Projekt wichtige Vorgaben aus dem Umsetzungskonzept der hessischen Landesregierung

zum hessischen Energiegipfel. Das HLNUG wurde vom Umweltministerium mit der wissenschaftlich-geologischen Begleitung des Projekts beauftragt.

Das am 21.12.2010 begonnene Pilotprojekt ist nach Fertigstellung die erste Geothermie-Nutzung im mitteltiefen bis tiefen Bereich in Hessen. Im Juni 2012 wurden die Bohrarbeiten für die 773 m mitteltiefe Erdwärmesonde abgeschlossen. Seit Aufnahme des Regelbetriebs im April 2013 entzog sie bis April 2014 knapp 52 MWh an thermischer Energie dem Untergrund. Diese verhältnismäßig geringe Wärmemenge war bedingt durch den niedrigen Heizbedarf in Folge des milden Winters 2013/2014 (STEINER 2014).

Neben der tiefen Erdwärmesonde zum Heizen der Produktionsgebäude werden auch acht „herkömmliche“ Doppel-U-Erdwärmesonden mit Tiefen von 90 bis 138 m zum Heizen und Kühlen verwendet. Eine dieser Bohrungen wurde als Kernbohrung ausgeführt. Die Tiefbohrung erschließt als erste in Hessen das kristalline Grundgebirge, Gneise mit unterschiedlichen Anteilen an typischen Mineralen wie Quarz, Glimmer, Feldspat sowie Hornblende und Granat, über eine große Bohrlänge von über 750 m.

Eine Kamerabefahrung und ein Pumpversuch in der flachen Kernbohrung ergaben eine im Gneis nicht erwartete Grundwasserführung in Klüften, die bis zu 2,5 cm weit geöffnet sind. Bei 326 m Tiefe wurde eine breiige, hydrothermal veränderte Zone mit ca. 6 m Mächtigkeit erbohrt, die die Bohrlochstabilität beeinträchtigte. Dennoch sind die Durchlässigkeiten des mit der Tiefbohrung erschlossenen Gesteinspaketes insgesamt gering.

### 5.3.2 Bohrungen

Im Bereich des hessischen Odenwaldes und des Sprendlinger Horstes sind deutlich weniger Bohrungen vorhanden als im westlich benachbarten nördlichen Oberrheingraben. Der Sprendlinger Horst ist zumin-

Die Wärmeleitfähigkeiten liegen in geringeren Tiefen zwischen 2,5 und 3 W/(m·K), in größeren Tiefen wegen des hohen Quarzanteils höher (3,5 bis 4 W/(m·K)). Der geothermische Gradient liegt im Bereich von 3,26 K/100 m. Die Temperatur im tiefsten Bereich der Sonde liegt bei 36,7 °C; die mittlere Wärmeleitfähigkeit bei 3 W/(m·K) sowie die durchschnittliche volumetrische Wärmekapazität bei 2,3 MJ/(m<sup>3</sup>·K) (STEINER 2014).

Die Bohrung liefert wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des strukturellen Aufbaus des Kristallinen Odenwaldes und der geologischen und hydrogeologischen Interpretation der umfangreich vorgenommenen geophysikalischen Bohrlochmessungen. Die gewonnene Datenfülle ist eine Grundlage zur Planung weiterer Projekte und erlaubt Vergleiche zu anderen Tiefbohrungen in Kristallingesteinen, z. B. bezüglich der Entwicklung von Durchlässigkeiten, Porositäten und Wärmeleitfähigkeiten mit zunehmender Tiefe (KÖTT et al. 2013).

dest in den Randbereichen mit 2,9 Bohrungen/km<sup>2</sup> gut erkundet. In den anderen Gebieten sind etwa zwischen 0,4–1,4 Bohrungen/km<sup>2</sup> vorhanden.

**Tab. 5.6:** Teufen der Bohrungen (Stand Oktober 2016)

	Anzahl	Anteil in %
<b>Bohrungen insgesamt</b>	<b>3340</b>	<b>100,0</b>
Bohrungen mit Teufen < 10 m	1838	55,0
Bohrungen mit Teufen ≥ 10 m	1502	45,0
Bohrungen mit Teufen ≥ 10 m	1502	100,0
davon > 10–20 m	688	45,8
> 20–50 m	467	31,1
> 50–100 m	240	16,0
> 100–200 m	88	5,9
> 200–500 m	17	1,1
> 500 m	2	0,1

In der folgenden Tabelle sind die Bohrungen mit Teufen  $\geq 10$  m für die hydrogeologischen Einheiten zusammengestellt.

**Tab. 5.7:** Anzahl der Bohrungen  $\geq 10$  m Tiefe je hydrogeologischer Einheit (Stand Oktober 2016)

	Fläche in km <sup>2</sup>	Anzahl	Bohrungen pro km <sup>2</sup>
<b>Kristalliner Odenwald</b>			
Bergsträßer Odenwald	508	520	1,0
Böllsteiner Odenwald	104	85	0,8
<b>Buntsandstein-Odenwald</b>			
davon Michelstädter Graben	45	63	1,4
<b>Sprendlinger Horst (Rotliegend)</b>			
	206	597	2,9
zum Vergleich: nördlicher Oberrheingraben			
	1.250	8.275	6,6

1.500 Bohrungen mit Teufen  $\geq 10$  m waren hinsichtlich ihres Bohrzweckes auswertbar. Etwa ein Drittel aller niedergebrachten Bohrungen mit Teufen  $\geq 10$  m dienen der Grundwassererschließung (Trinkwasserbrunnen, Beregnungsbrunnen, Grundwassermessstellen, Industriebrunnen, Notbrunnen, Schluckbrunnen/Versenkungen). Ein weiteres Drittel der Bohrungen dient der allgemeinen Erkundung (Aufschlussbohrungen, Baugrundbohrungen,

bodenkundliche Bohrungen und Untersuchungsaufschlüsse, geologische Kartierungen, geophysikalische Bohrungen, Untergrunderkundungen zu z. B. Altlasten). Ca. 27 % aller Bohrungen dienen der Lagerstättenerkundung, der Nutzung von Erdöl und Natursteinen. Weitere 9 % dienen der Nutzung von Erdwärme durch Erdwärmesonden oder Grundwasserwärmepumpen.

**Tab. 5.8:** Zweck der Bohrungen mit Teufen  $\geq 10$  m (Stand Oktober 2016)

	Anzahl	Anteil in %
Bohrungen $\geq 10$ m	1502	100,0
zum Zweck der		
allgemeinen Erkundung	512	34,1
Lagerstättenerkundung	392	26,1
Erdwärme	167	11,1
Grundwasser	429	28,6
unbekannt	2	0,1

Der überwiegende Anteil der Bohrungen mit Teufen  $< 10$  m (86 %) sind Erkundungsbohrungen.

Im Kristallinen Odenwald sind insgesamt 1.511 Bohrungen verfügbar, wovon 605 Bohrungen eine Teufe von  $\geq 10$  m aufweisen. Im Buntsandstein waren im Jahre 2016 insgesamt 701 Bohrungen im Archiv des HLNUG dokumentiert, davon befinden sich 113 im Michelstädter Graben. Im Sprendlinger

Horst sind insgesamt 1.128 Bohrungen im HLNUG-Bohrarchiv dokumentiert, wovon 597 Bohrungen eine Teufe von  $\geq 10$  m aufweisen.

Abb. 5.14 gibt einen Überblick über Lage und Teufen der vorhandenen Bohrungen. Abb. 5.15 zeigt die vorhandenen Bohrungen mit Informationen zum Zweck der Bohrung im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein-Odenwald und im Sprendlinger Horst.



**Tab. 5.9:** Teufen der Bohrungen im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein-Odenwald und im Sprendlinger Horst (Stand Oktober 2016)

Kristalliner Odenwald			
	Anzahl Bergsträßer Odenwald	Anzahl Böllsteiner Odenwald	Anteil in %
Bohrungen < 10 m	858	48	
Bohrungen ≥ 10 m	520	85	100,0
davon ≥ 10 bis 20 m	263	37	49,6
> 20 bis 50 m	138	35	28,6
> 50 bis 100 m	84	11	15,7
> 100 m	35	2	6,1
Buntsandstein-Odenwald			
	Anzahl Buntsandstein-Odenwald	Anzahl Michelstädter Graben	Anteil in %
Bohrungen < 10 m	351	50	
Bohrungen ≥ 10 m	237	63	100,0
davon ≥ 10 bis 20 m	83	23	35,3
> 20 bis 50 m	75	25	33,3
> 50 bis 100 m	52	7	19,7
> 100 m	27	8	11,7
Sprendlinger Horst			
	Anzahl		Anteil in %
Bohrungen < 10 m	531		
Bohrungen ≥ 10 m	597		100,0
davon ≥ 10 bis 20 m	282		47,2
> 20 bis 50 m	194		32,5
> 50 bis 100 m	86		14,4
> 100 m	35		5,9



Abb. 5.14: Vorhandene Bohrungen mit Teufeninformation im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein-Odenwald und im Sprendlinger Horst (Teufe in m; Bohrdatenbank Stand Oktober 2016)

Im Folgenden werden die vorhandenen Bohrungen nach ihrem Zweck tabellarisch zusammengefasst. Die auffällig hohe Anzahl von Lagerstättenboh-

rungen im Bereich des Sprendlinger Horstes geht im Wesentlichen auf die Erkundung der Tonschiefer der Grube Messel zurück.

**Tab. 5.10:** Zweck der Bohrungen im Kristallinen Odenwald im Buntsandstein-Odenwald und im Sprendlinger Horst für Teufen  $\geq 10$  m (Stand Oktober 2016)

Kristalliner Odenwald			
	Anzahl Bergsträßer Odenwald	Anzahl Böllsteiner Odenwald	Anteil in %
Bohrungen $\geq 10$ m	520	85	100,0
zum Zweck der			
allgemeinen Erkundung	209	51	42,9
Lagerstätten erkundung	16	5	3,5
Erdwärme	82	11	15,4
Grundwasser	213	18	38,2
unbekannt	0	0	0,0

Buntsandstein-Odenwald			
	Anzahl Buntsandstein-Odenwald	Anzahl Michelstädter Graben	Anteil in %
Bohrungen $\geq 10$ m	237	63	100,0
zum Zweck der			
allgemeinen Erkundung	108	30	46,0
Lagerstätten erkundung	5	0	1,7
Erdwärme	43	8	17,0
Grundwasser	81	25	35,3

Sprendlinger Horst		
	Anzahl	Anteil in %
Bohrungen $\geq 10$ m	597	100,0
zum Zweck der		
allgemeinen Erkundung	114	19,1
Lagerstätten erkundung	366	61,3
Erdwärme	23	3,9
Grundwasser	92	15,4
unbekannt	2	0,3

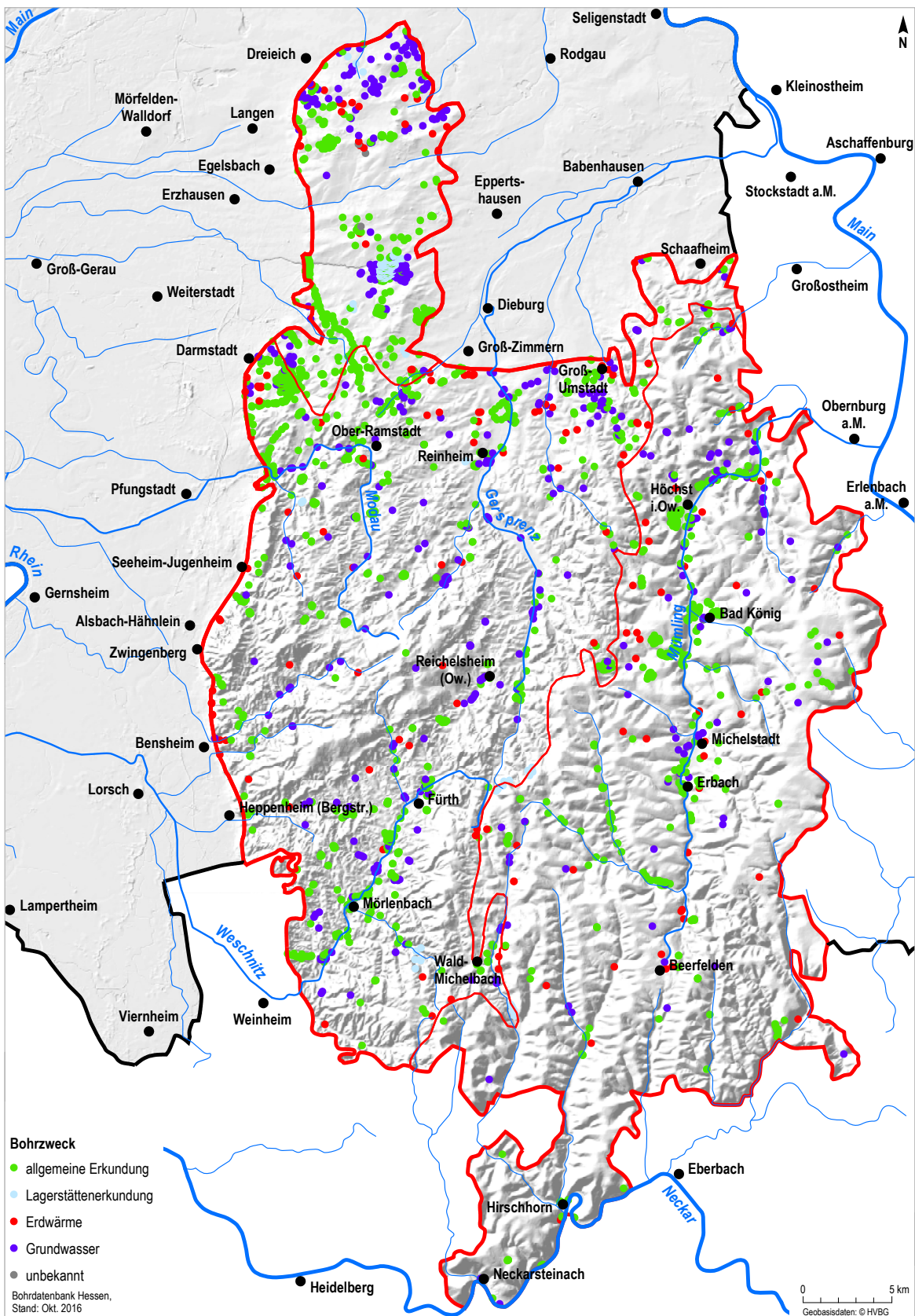


Abb. 5.15: Vorhandene Bohrungen mit Information zum Zweck der Bohrung im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein Odenwald und im Spendinger Horst (Bohrdatenbank Stand Oktober 2016)

### 5.3.3 Grundwassererschließung und Grundwasserförderung

Sowohl im Kristallinen Odenwald als auch im Buntsandstein-Odenwald wird die Trinkwasserversorgung überwiegend mittels Quelfassungen realisiert. Die Grundwassererschließung über Brunnen ist aufgrund der geologischen Verhältnisse nur untergeordnet möglich.

Im Kristallinen Odenwald wird hauptsächlich die Vergrusungszone als Grundwasserleiter erschlossen. Der Buntsandstein des Odenwaldes ist durch ein weitständiges Kluftnetz gekennzeichnet. Der zwischen den Klüften befindliche Sandstein wird aufgrund seiner Dichte vom Grundwasser gering durchflossen. Vor allem bei den in den 1970er und 1980er Jahren niedergebrachten Bohrungen wurde oftmals kein Grundwasser angetroffen, selbst wenn

die Endteufe der Bohrungen unterhalb des Niveaus des Neckars bzw. Mains lag. Eine hohe Grundwasserergiebigkeit ist auf gut wasserführende Kluft- und Störungszonen beschränkt.

In Kapitel 6.3.2 wird auf den mengenmäßigen Zustand nach EG-WRRL bezogen auf Grundwasserkörper eingegangen. Danach befinden sich die Grundwasserkörper des Odenwaldes in einem mengenmäßig guten Zustand. Das meiste Grundwasser wird im Buntsandstein-Odenwald gefördert. Aufgrund der geringen Höffigkeit werden im Sprendlinger Horst und im neckarnahen Raum nur sehr geringe Mengen Grundwasser entnommen (Abb. 5.16).

### 5.3.4 Grundwasserstände

Eine Auswertung der mittleren Grundwasserstände für die auswertbaren Bohrungen, inklusive der Angaben zum Wasserstand bei der Bohrprofilaufnahme, ermöglicht einen näherungsweise Überblick über die Grundwasseroberfläche und damit über die Grundwasserflurabstände. Da diese Werte in ihrer Qualität sehr unterschiedlich sind und sie auch nicht zu einem Stichtag aufgenommen wurden, verbietet sich eine Auswertung als Grundwassergleichenplan. Die in Abb. 5.17 dargestellten Grundwasserflurabstände dienen daher lediglich der groben Orientierung.

Insgesamt wurden für den Kristallinen Odenwald die Daten von 1.748 Bohrungen/Messstellen ausgewertet. Dabei standen für den Kristallinen Odenwald 1056 Angaben zu Grundwasserständen, für den Buntsandstein-Odenwald 461 und für den Sprendlinger Horst 219 Angaben zu Grundwasserständen zur Verfügung.

Im Kristallinen Odenwald haben die meisten Messstellen einen mittleren Flurabstand bis zu 5 m. An 23 Messstellen wurden Grundwasserflurabstände zwischen 20 und 40 m, an einer Messstelle von 74 m gefunden.

Die verfügbaren Bohrungen im Bereich des Buntsandstein-Odenwaldes haben zumeist einen mittleren Flurabstand bis zu 5 m. An 7 Messstellen wurden Grundwasserflurabstände über 50 m ermittelt.

Im Bereich des Sprendlinger Horstes standen 219 Messstellen mit Daten zur Auswertung zur Verfügung. Nur vier Messstellen wiesen Grundwasserflurabstände zwischen 20 und 31 auf, die anderen haben ebenfalls mittlere Flurabstände bis zu 5 m.

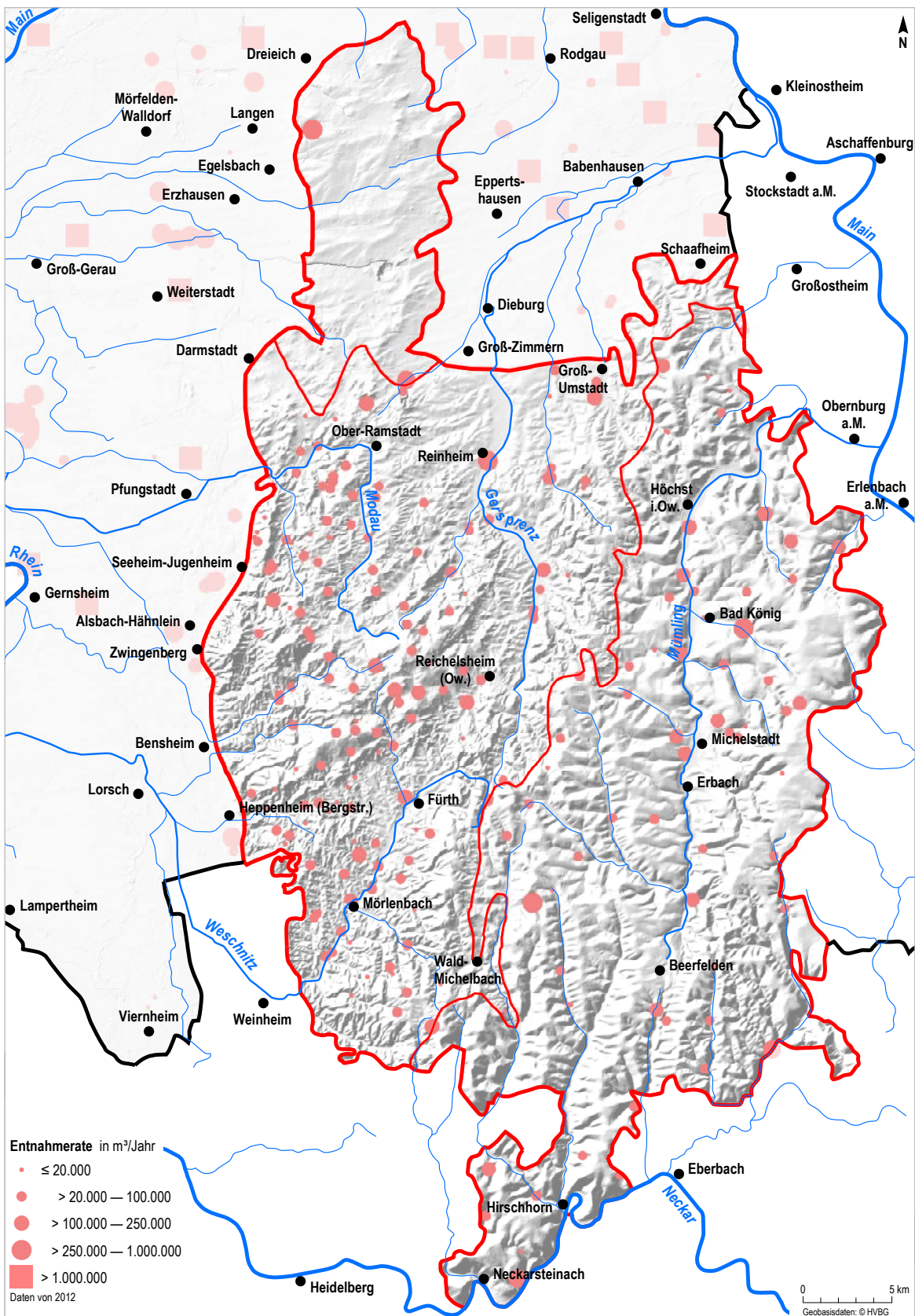


Abb. 5.16: Entnahme in Einzelanlagen und Anlagengruppen im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein-Odenwald und im Sprendlinger Horst in m<sup>3</sup>/Jahr (Stand 2012)

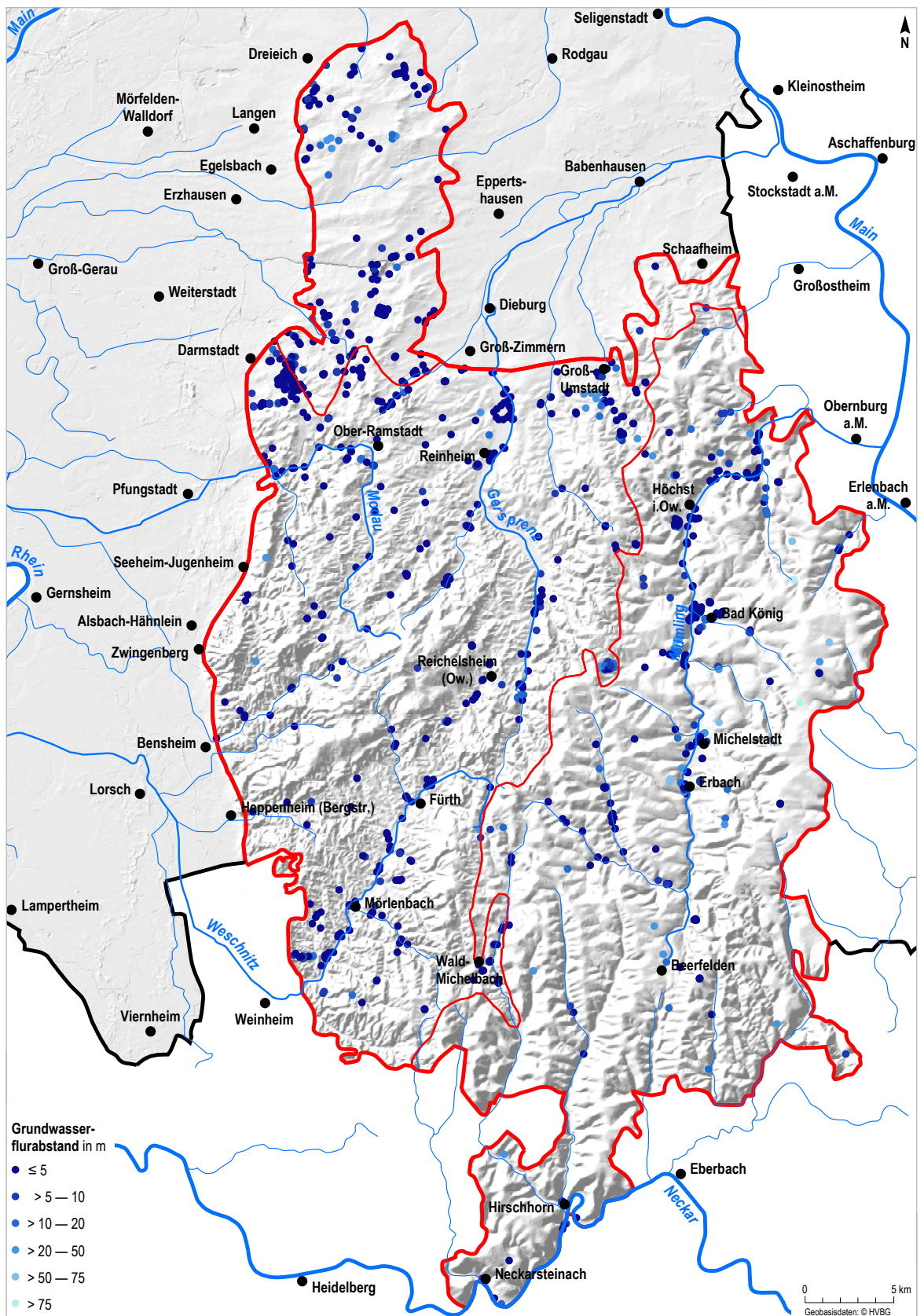


Abb. 5.17: Punktuelle Darstellung mittlerer Grundwasserflurabstände im Kristallinen Odenwald, im Buntsandstein-Odenwald und im Spremlinger Horst (Bohrdatenbank Stand Oktober 2014)

## 5.4 Quellen und Schüttungsverhalten

Im Odenwald werden Quellen in vielen Gemeinden zur dezentralen Trinkwasserversorgung genutzt.

Das Grundwasser ist Teil des Wasserkreislaufs. Die Schwankungen der Grundwasserstände und der Quellschüttungen sind ein sicht- und messbarer Ausdruck für die Vorratsänderungen in den Grundwasserstockwerken. Im Rahmen des Landesgrundwasserdienstes wird ein flächendeckendes Messnetz unterhalten, das für Grundwasserstände und Quellschüttungen repräsentative Werte liefert.

Mit langfristigen Beobachtungen von Grundwasserständen und Quellschüttungen sind Entwicklungen zu erkennen, die als Grundlage für wasserwirtschaftliche Planungen dienen. Die Extremwerte, höchste und niedrigste Grundwasserstände und Quellschüttungen, und deren Häufigkeit werden herangezogen, wenn z. B. Eingriffe in das Grundwasser zu beurteilen sind, u. a. für die Planung von Bauwerken.



Abb. 5.18: Modau-Quelle



Die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände und Quellschüttungen wird in Gangliniengrafiken dargestellt. Typische Ganglinien haben großräumig einen ähnlichen Verlauf, oft unabhängig von der Art und der Lage des Grundwasserleiters. Die Schwankungen sind geprägt durch die Höhe der Grundwas-

serneubildung aus Niederschlag, die hydraulische Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und die Morphologie der Landschaft. Die Lagepunkte der vier Messstellen, deren Messwerte als Ganglinien nachfolgend dargestellt werden, sind in der Übersichtskarte Abb. 5.19 mit Messstellennummern markiert.

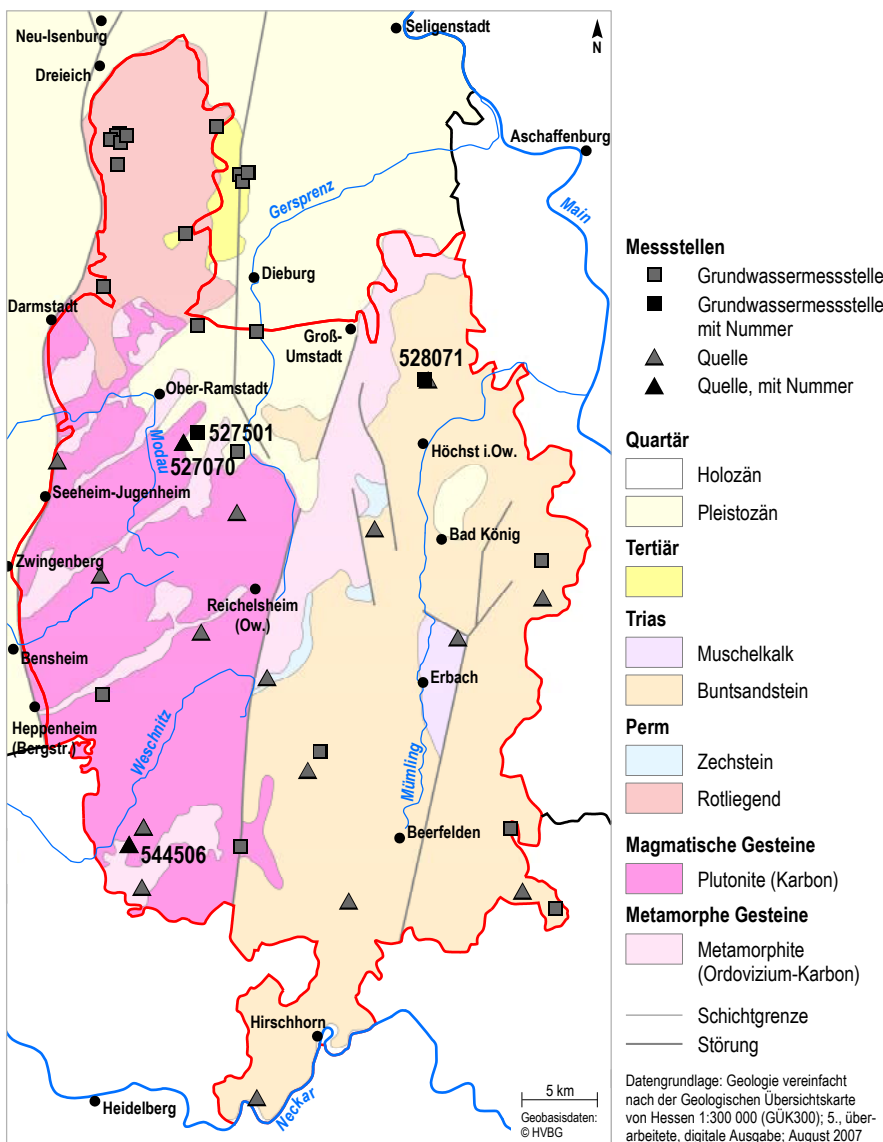


Abb. 5.19: Messstellen zur Überwachung der Grundwasserstände und Quellschüttungen

### 5.4.1 Quellen

Typische Ganglinien der Quellschüttungen haben einen jahreszeitlichen Verlauf mit geringer Schüttung im Sommerhalbjahr und der höchsten Schüttung um die Jahreswende. Im Winter erreicht ein großer Teil des Niederschlags das Grundwasser, da die Evapotranspiration bei niedrigeren Temperaturen und schwacher Vegetation gering ist. Im Sommer findet meist eine Grundwasserzehrung statt und die Schüttungen nehmen ab. Die langjährigen Ganglinien sind überprägt von Nass- und Trockenperioden. In den

letzten Jahrzehnten waren im Odenwald die Jahre in den Zeiträumen 1965–1970, 1980–1987 und 1999–2001 niederschlagsreich, die Jahre 1962–1964, 1971–1977 und 1989–1994 waren niederschlagsarm.

Viele Quellen reagieren auf die Änderungen des Witterungsgeschehens mit wellenartigen Zu- und Abnahmen der Schüttungen bis hin zum zeitweisen Versiegen von Quellen in den Sommermonaten.

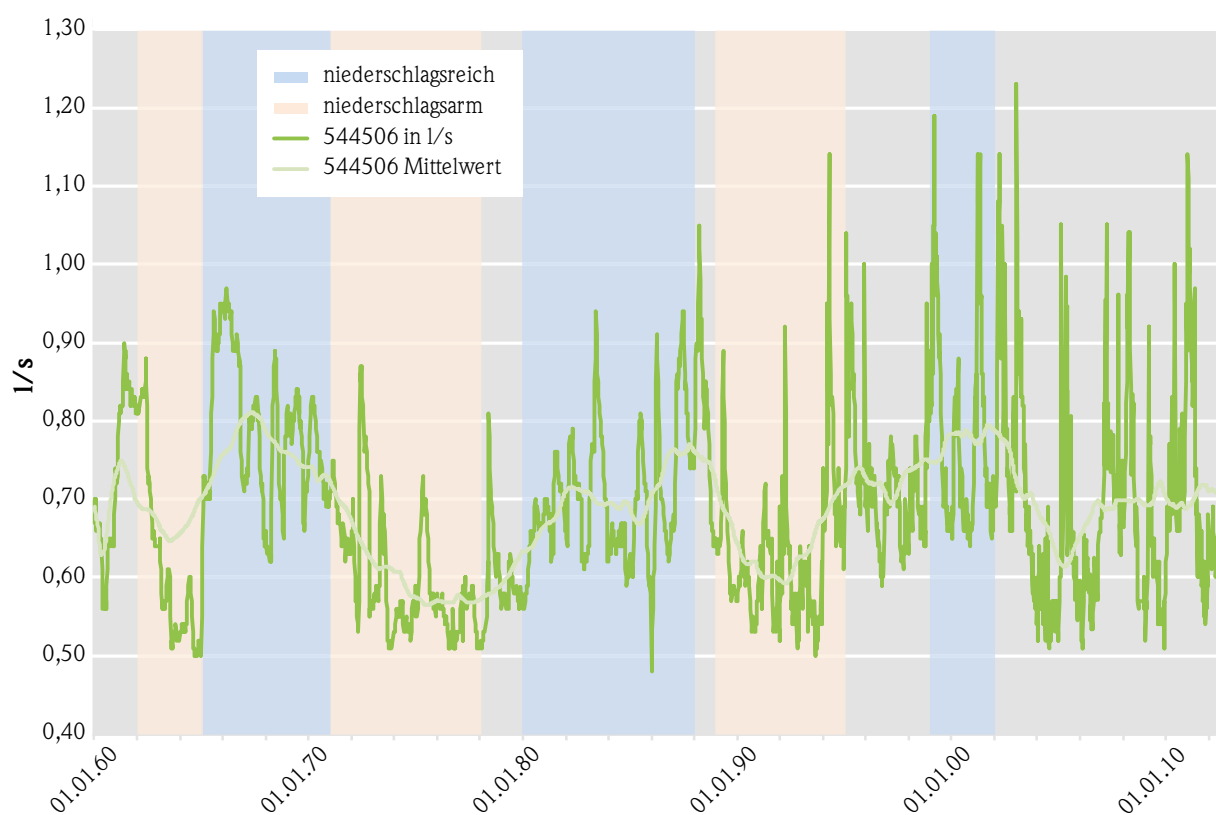
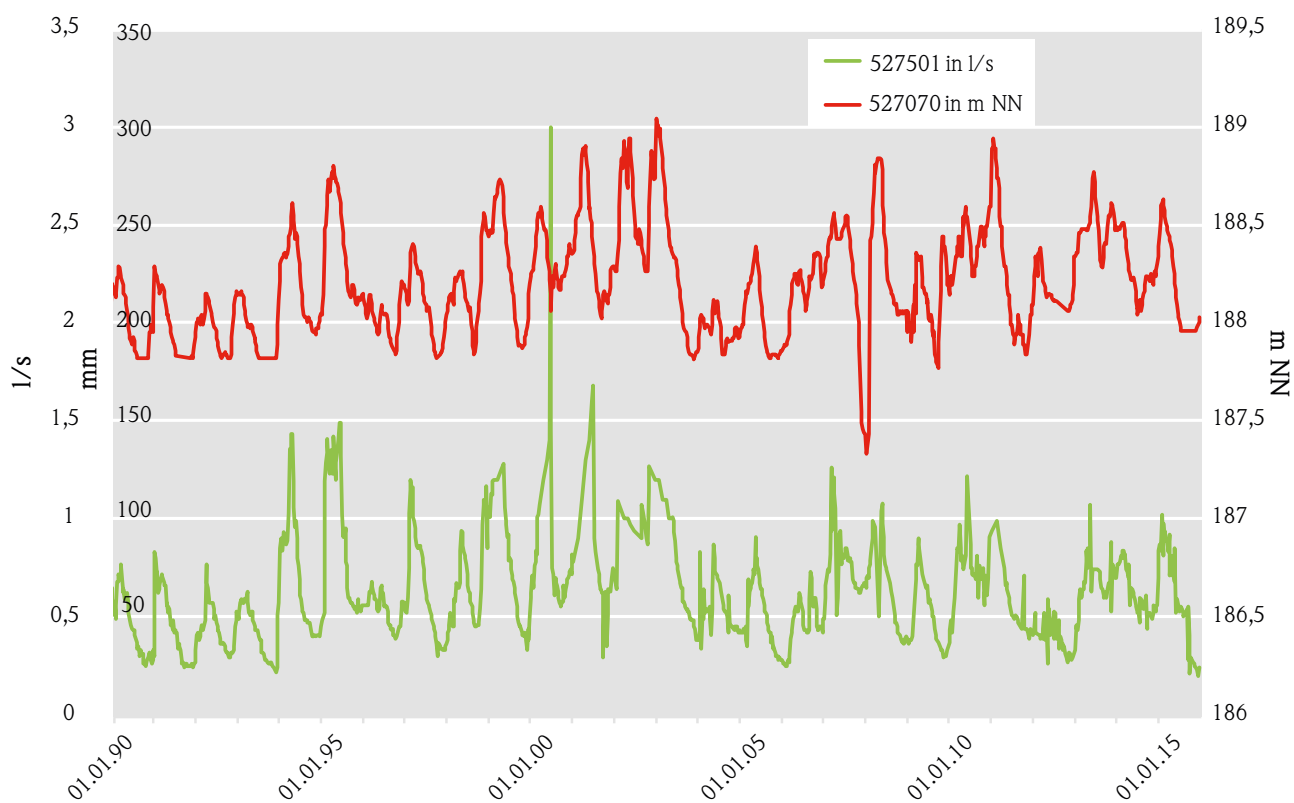


Abb. 5.20: Schüttungsganglinie und Mittelwert der Quelle Birkenau (544506), Granit; mit Darstellung der Nass- und Trockenperioden im Odenwald

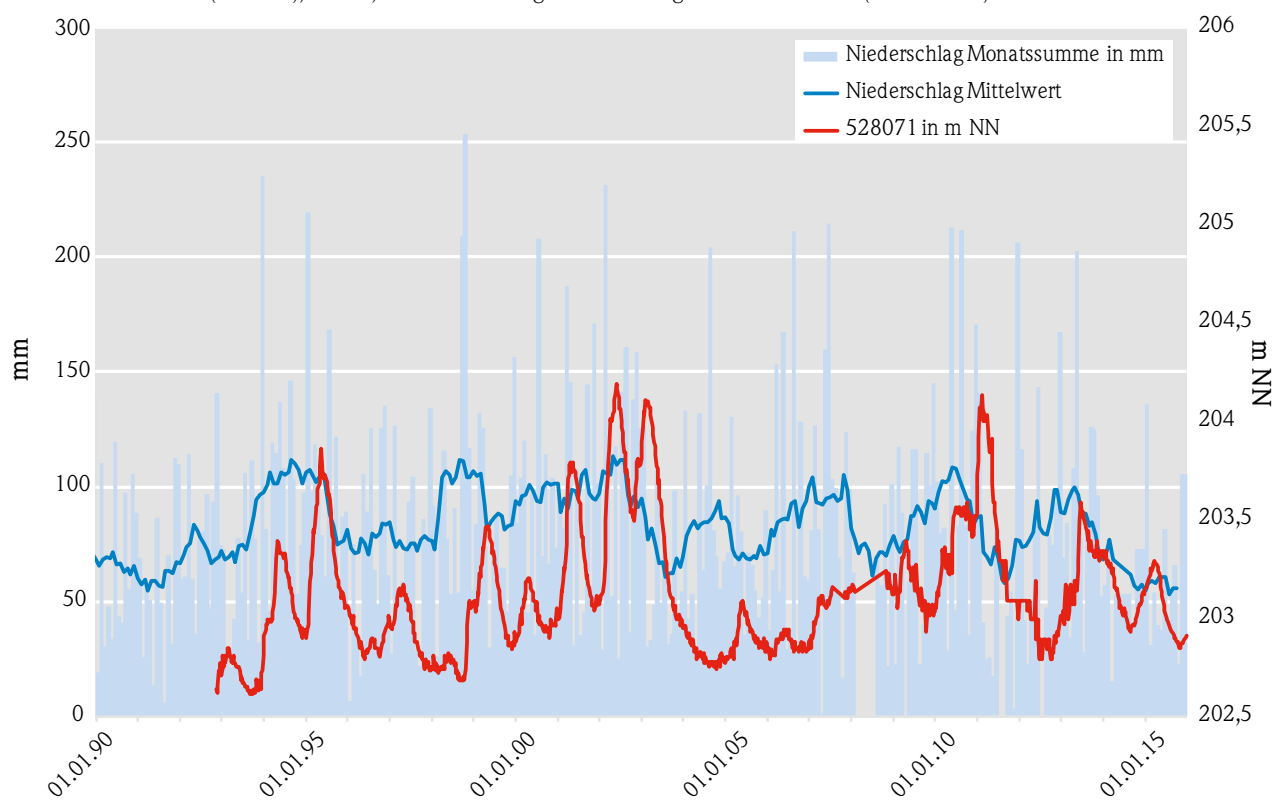
### 5.4.2 Grundwassermessstellen

Die Grundwasserstände werden in Grundwassermessstellen und in nicht mehr genutzten Schachtbrunnen, die es im Odenwald häufig gibt, regelmäßig gemessen. In flachen Messstellen sind jahreszeitlich ausgeprägte Schwankungen des Wasserspiegels, ähnlich denen der Quellschüttungen, zu beobachten (siehe Abb. 5.21). Bei tieferen Grundwassermessstellen reagieren die

Wasserstände langsamer auf die Grundwasserneubildung und die Ganglinien sind geglättet (siehe Abb. 5.22). Auch bei Trocken- und Nassperioden gleicht das Verhalten typischer Grundwasserstände dem von Quellschüttungen, jedoch mit teilweise mehrwöchigen Verzögerungen in tieferen Grundwassermessstellen.



**Abb. 5.21:** Schüttungsganglinie der Quelle Wembach (527501) und Grundwasserstandsganglinie der Grundwassermessstelle Wembach (527070), Granit; mit Niederschlags-Monatsmenge Fürth-Krumbach (1990–2015)



**Abb. 5.22:** Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Heubach (528071), Granit unter Buntsandstein; mit Niederschlags-Monatsmenge und Mittelwert von Fürth-Krumbach (1990–2015)

## 5.5 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und Verweilzeiten

Die Berechnung der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung erfolgte für die Lockergesteinsbereiche nach der Methode der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands (HÖLTING et al. 1995) auf Basis der Grundwasserhöhen bzw. der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung, die im Rahmen der Erstellung des „Konzeptionellen hydrogeologischen Modells zur Analyse und Bewertung von Verweilzeiten in Hessen“ (Verweilzeitenmodell Hessen; HERRMANN 2010; WENDLAND et al. 2011) berechnet wurden, sowie unter Verwendung der hydrogeologischen Attribute aus der Hydrogeolo-

gischen Übersichtskarte Deutschland 1 : 200 000 (HÜK 200; DÖRHÖFER et al. 2001, HANNAPPEL et al. 2003).

Für die Festgesteinsbereiche wurden ebenfalls die Daten aus dem Verweilzeitenmodell Hessen verwendet. Hier wurden jedoch direkt die im Modell enthaltenen Rasterdaten zu den Verweilzeiten in der ungesättigten Zone entsprechend Tabelle 5 aus HÖLTING et al. 1995 in Punktzahlen der Gesamtschutzfunktion umgerechnet.

### 5.5.1 Grundlagendaten für die Berechnung in Lockergesteinsbereichen

Für die in HÖLTING et al. (1995) angegebenen Parameter standen folgende Datensätze zur Verfügung:

- **Faktor B (Bewertung der Böden):** Nutzbare Feldkapazität aus den Bodenflächendaten 1 : 50 000 von Hessen (BFD 50)
- **Faktor W:** Bewertung der Grundwasserneubildungsrate aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell Hessen (MORHARD 2012, HERGESELL & BERTHOLD 2005)
- **Faktor M:** Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung aus dem Raster „Flurabstand“ des Verweilzeitenmodells Hessen
- **Faktor GL:** Bewertung der Gesteinsart bei Lockergesteinen (Attribute der HÜK 200, wobei bei

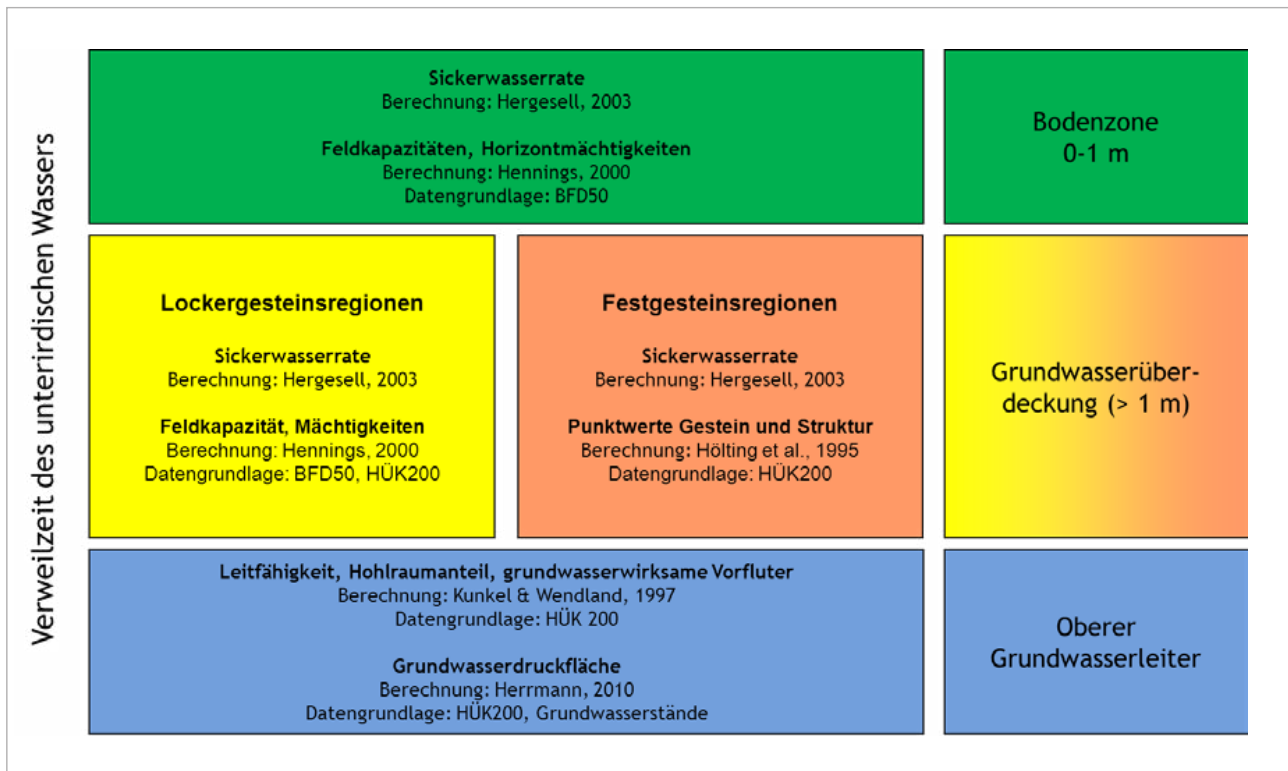
Vorhandensein von Flächen mit ausgewiesenen quartären Deckschichten auf der HÜK 200 deren Petrografie gesondert bewertet wurden. Die die Deckschichten unterlagernden oder bereits an der Erdoberfläche anstehenden ungesättigten Bereiche des in der HÜK 200 dargestellten Obersten Grundwasserleiters wurden nach der petrografischen Beschreibung der jeweiligen hydrogeologischen Einheit bewertet.)

- **Faktor Q (schwebende Grundwasserstockwerke) und D (artesische Druckverhältnisse)** konnten wegen fehlender Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden

### 5.5.2 Grundlagendaten für die Berechnung in Festgesteinsbereichen

Abb. 5.23 zeigt den hierarchischen Aufbau des Verweilzeitenmodells Hessen sowie die Parameter, Datengrundlagen und Berechnungsansätze, die zur Berechnung der Verweilzeiten verwendet wurden. Für die Ableitung der Schutzwirkung im Festgesteinsbereich für den Odenwald wurden hiervon nur die Daten für die Bodenzone zwischen 0–1 m Tiefe und die Grundwasserüberdeckung < 1 m Tiefe in den Festgesteinsregionen verwendet. Die Sickerwasserrate stammt aus der Bewertung der Grundwasserneubildungsrate aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell Hessen (MORHARD

2012, HERGESELL & BERTHOLD 2005). Zur Bewertung der Gesteinsart wurden Angaben zur Petrografie und Stratigrafie aus der HÜK 200 verwendet. Die Zuordnung der Strukturfaktoren erfolgte zusätzlich auch über eine Auswertung der tektonischen Beanspruchung (Störungsdichte) einer geologischen Einheit anhand der Geologischen Übersichtskarte 1 : 200 000 (GÜK 200). Die Schichtmächtigkeiten ergeben sich aus dem um die Mächtigkeiten von Bodenzone und möglichen quartären Deckschichten reduzierten Flurabstand.



**Abb. 5.23:** Schematische Darstellung der bei der Ermittlung der Verweilzeiten des unterirdischen Wassers betrachteten Tiefenbereiche, der verwendeten Datengrundlagen bzw. Parameter und der jeweiligen Berechnungsansätze (aus WENDLAND et al. 2011)

### 5.5.3 Übersichtskarte der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung im Odenwald

Die in Abb. 5.24 dargestellte Übersichtskarte der Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung lässt eine deutliche Abhängigkeit von der geologischen Großgliederung des Odenwaldes erkennen.

Aufgrund der geringen Grundwasserflurabstände sind in den Lockergesteinsbereichen der Talauen meistens sehr geringe Schutzwirkungen vorhanden. Hohe Schutzwirkungen gibt es insbesondere am westlichen Odenwaldrand, wo mächtige Lössüberdeckungen über dem kristallinen Untergrund anstehen. Der kristalline Untergrund seinerseits weist meist geringe, in höheren Lagen auch eine mittlere Schutzwirkung auf. Im Buntsandstein-Odenwald existieren aufgrund des oft hohen Grundwasserflurabstands und der starken Relieferung größere Flächen mit einer hohen oder mittleren Schutzwirkung. Im Bereich

Hirschhorn liegt das Vorflutniveau durch den tiefen Einschnitt des Neckars für den Hautgrundwasserleiter des Buntsandsteins ebenfalls tief, was hohe Grundwasserflurabstände und somit hohe bis mittlere Schutzwirkungen bewirkt.

Der Bereich des Sprendlinger Horstes zeigt hauptsächlich eine sehr geringe, gelegentlich auch geringe Schutzwirkung. Häufig wurden schwebende Grundwasserleiter mit geringem Flurabstand angetroffen. Wegen der geringen Ergiebigkeit der Rotliegend-Gesteine gibt es hier jedoch keine Brunnen der öffentlichen Wasserversorgung. Insofern kommt der ermittelten geringen Schutzwirkung nicht die Bedeutung zu, die sie in Gebieten mit wasserwirtschaftlicher Nutzung hat.

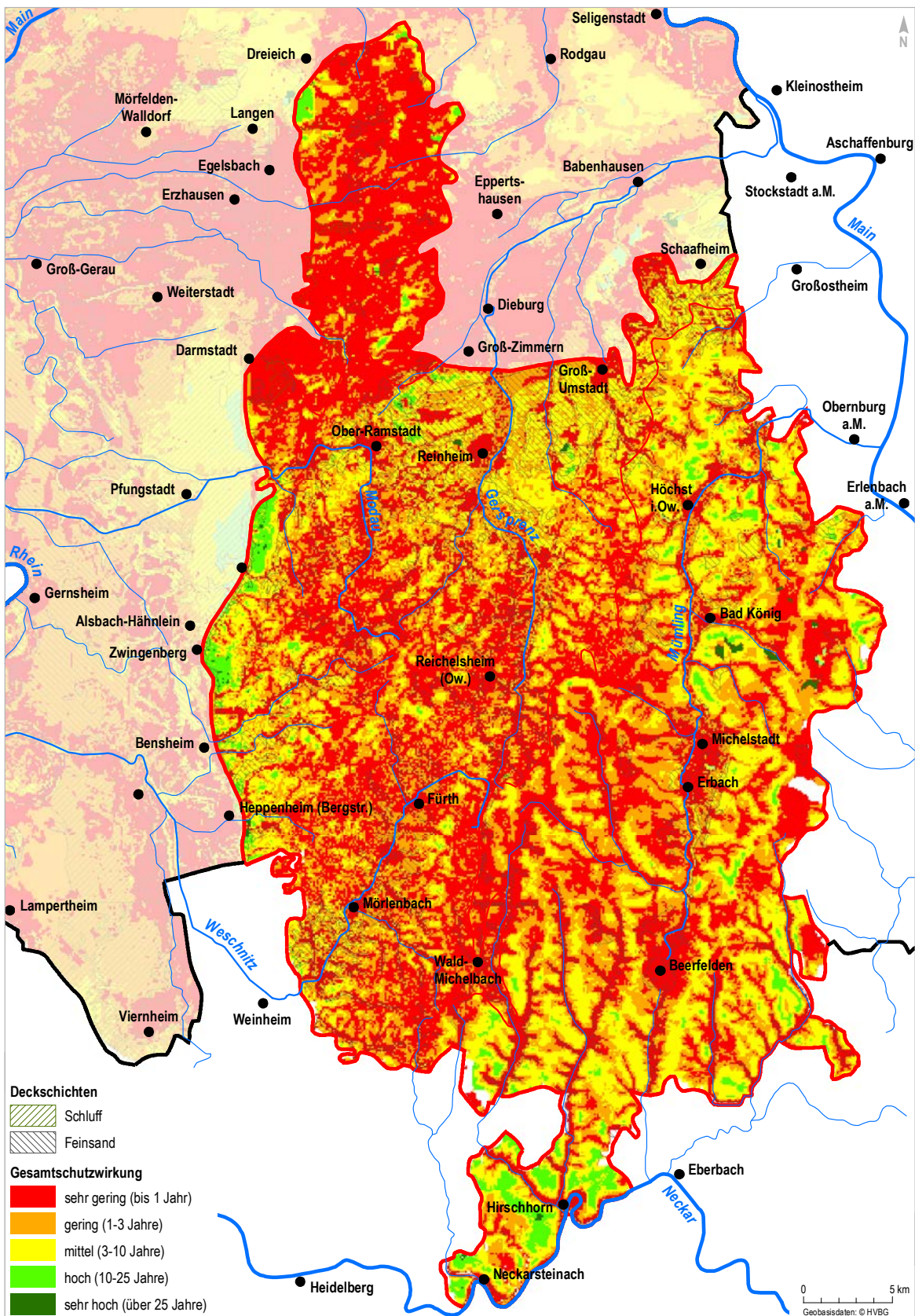


Abb. 5.24: Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

## 5.6 Grundwasserbeschaffenheit

### 5.6.1 Methodik und Zielsetzung der hydrochemischen Grundwasserbewertung

Im Kapitel Grundwasserbeschaffenheit werden insbesondere die von den unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Standortgegebenheiten innerhalb der drei Teilräume Buntsandstein-Odenwald, Kristalliner Odenwald und Sprendlinger-Horst abhängigen Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit dargestellt. Von besonderem Interesse sind dabei die geogen bedingten Ionenkonzentrationen der Haupt- und Spurenstoffe. Die Dokumentation einer flächendeckenden Erfassung und Auswertung geogener Hintergrundwerte der Haupt- und Spurenstoffe hessischer Grundwässer wurde im Jahr 2013 mit dem Band 118 der HLNUG-Reihe „Geologische Abhandlungen Hessen“ (LUDWIG 2013) veröffentlicht. Die Auswahl der

Probenahmestellen erfolgte dabei mit der Zielsetzung, anthropogen weitgehend unbelastete Grundwässer zu erhalten. Ausführliche Informationen zur Probenahme und Analytik sind in LUDWIG (2013) dokumentiert. Umfangreiche flächenhafte Auswertungen zur Beschaffenheit hessischer Grundwässer wurden zudem mit dem Grundwasserbeschaffenheitsbericht 2012 des HLNUG vorgelegt (HLUG 2013). Als Datengrundlage diente hierbei die hessische Grundwasserdatenbank (GruWaH).

Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse dieser beiden Veröffentlichungen bezogen auf die drei hydrogeologischen Teilräume dargestellt und erläutert.

### 5.6.2 Grundwässer des Buntsandstein-Odenwaldes

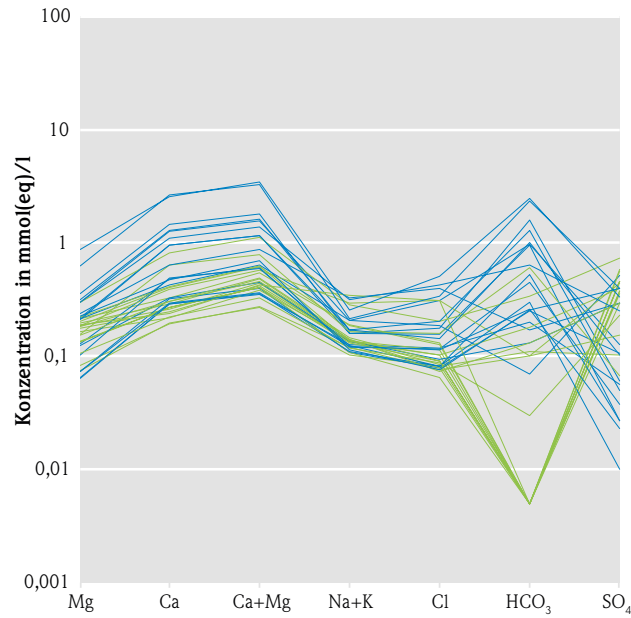
Die Grundwasserbeschaffenheit im Buntsandstein des Odenwaldes zeigt eine auffällige hydrochemische Gliederung in Quell- und Brunnenwässer (Abb. 5.25 und Abb. 5.26).

Quellaustritte sind häufig an schwebende Grundwasserleiter gebunden, die in vielen Fällen die Drainage der Boden- und Auflockerungszone oberhalb des unverwitterten Gesteins darstellen. Nur bei einem Teil der beprobten Quellen zirkuliert das Grundwasser auch in den tieferen Kluftsystemen der Buntsandsteinabfolge. Charakteristisch für die sehr weichen Quellwässer (0,8–3,2 °dH, Abb. 5.35, Kapitel 5.6.5) ist ein Grundwasser des Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-(HCO<sub>3</sub>)-Typs (Abb. 5.26). Das Ca : Mg-Verhältnis liegt überwiegend bei 2 : 1 und die häufig sehr niedrige Alkalinität und Gesamtmineralisation deuten auf sehr junge Wässer und geringe Gesteinslösung hin. Die hydrogeochemische Genese ist vor allem durch Sorptions- und Austauschprozesse in der überdeckenden Bodenzone geprägt (QUADFLIEG 1990, BALÁZS 1998). Saure Wässer mit pH-Werten von 4,5 bis 6,6 (Abb. 5.27) sind ein Indiz für die Erschöpfung der Pufferkapazität des Bodens und eine zunehmende Versauerung des Grundwassers.

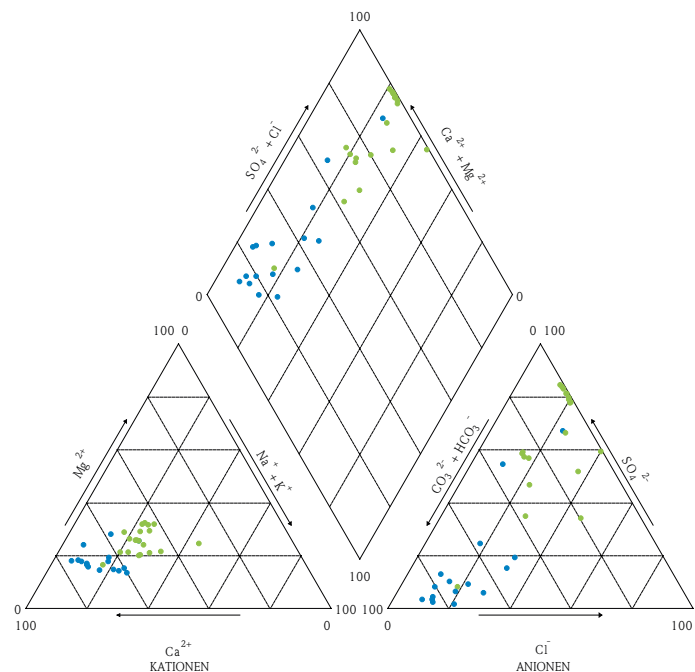
Die Brunnen hingegen fördern Grundwässer aus unterschiedlichen Tiefen des Kluftgrundwasserleitersystems Buntsandstein. Bei der hydrochemischen Ausprägung der Grundwässer dominieren hier Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen. Die Grundwässer sind mit Gesamthärten von 1,0–9,7 °dH (Abb. 5.35, Kapitel 5.6.5) als meist sehr weich bis weich einzustufen. Eine überwiegend silikatische Gesteinsverwitterung und untergeordnet die Lösung calzithaltiger Lössdecken mit lokaler Verbreitung bewirken durch sukzessive Säurepufferung deutlich höhere pH-Werte bis in den leicht basischen Bereich (5,1–7,2, Abb. 5.27). Charakteristisch für eine durch die Verwitterung geprägte Grundwasserbeschaffenheit sind Brunnenwässer des Ca-(Mg)-HCO<sub>3</sub>-Typs (Abb. 5.27, großes Kreisdiagramm; Abb. 5.29, blaue Punkte). Das Ca:Mg-Verhältnis liegt bei den Kluftgrundwässern im Bereich von ca. 4 : 1. Die Werte von Natrium, Kalium und Chlorid bewegen sich im selben Konzentrationsbereich wie bei den Quellgrundwässern und sind um ein bis zu Zehnfaches niedriger als die Ca+Mg- und HCO<sub>3</sub>-Konzentrationen (Abb. 5.28). Auffällig sind die gegenüber den Quellgrundwässern verringerten SO<sub>4</sub>-Konzentrationen. Die hierfür möglicherweise ursächliche SO<sub>4</sub>-Sorption an Oberflächen von Sekundärmineralen ist Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

Die typische ionare Zusammensetzung der Grundwässer ist anhand von zwei Kreisdiagrammen auf der Übersichtskarte des hydrogeologischen Teilraums (Abb. 5.27) dargestellt. Dabei repräsentiert das südliche Diagramm ein gering mineralisiertes, für den Buntsandstein typisches saures Grundwasser und das

nördliche Diagramm ein Grundwasser, das durch den lokalen Einfluss einer Lössüberdeckung deutlich höher mineralisiert und gepuffert wurde. Charakteristisch sind die bei den durch Löss beeinflussten Grundwässern erhöhten Konzentrationen von Ca und  $\text{HCO}_3$  und die geringere  $\text{SO}_4$ -Konzentration.



**Abb. 5.25:** Konzentrationsverteilung der gelösten ionaren Hauptinhaltsstoffe in den Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes (SCHOELLER-Diagramm, Linienfarbe blau = Brunnen, grün = Quellen)



**Abb. 5.26:** Darstellung der Ionenbeziehungen zwischen gelösten Anionen und Kationen in den Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes (PIPER-Diagramm, Punktfarbe blau = Brunnen, grün = Quellen)



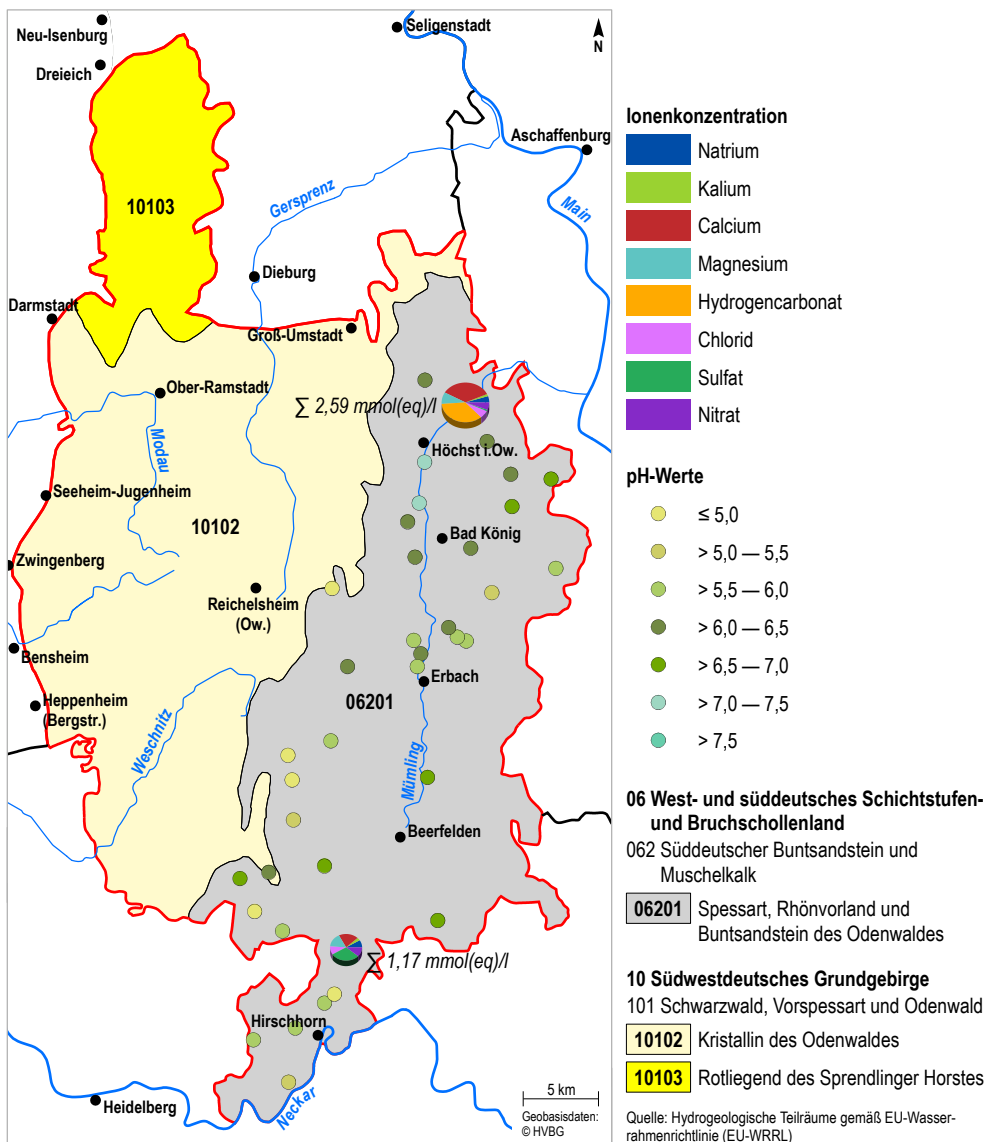


Abb. 5.27: Lage der 36 Beprobungspunkte für den Teilraum Buntsandstein-Odenwald mit pH-Werten der Grundwässer und typischer ionarer Zusammensetzung (Kreisdiagramme) sowie Gesamtmineralisation (Größe der Kreisdiagramme)

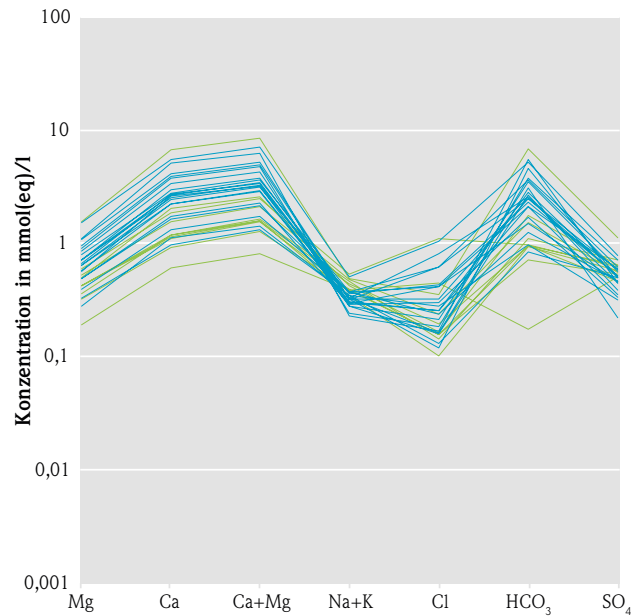
### 5.6.3 Grundwässer des Kristallinen Odenwaldes

Die untersuchten Grundwässer des kristallinen Grundgebirges entsprechen überwiegend dem Ca-(Mg-)HCO<sub>3</sub>-(SO<sub>4</sub>-)Typ (Abb. 5.29), wobei die flachgründigen Quellgrundwässer häufig niedrigere HCO<sub>3</sub>-Konzentrationen als die Brunnengrundwässer aufweisen. Eine eindeutige Abhängigkeit der Grundwasserbeschaffenheit von den geochemisch unterschiedlichen kristallinen Gesteinen ist nicht erkennbar. Sämtliche Wässer weisen ein charakteristisches Ca : Mg-Verhältnis von etwa 5 : 1 bis 6 : 1 auf, wobei

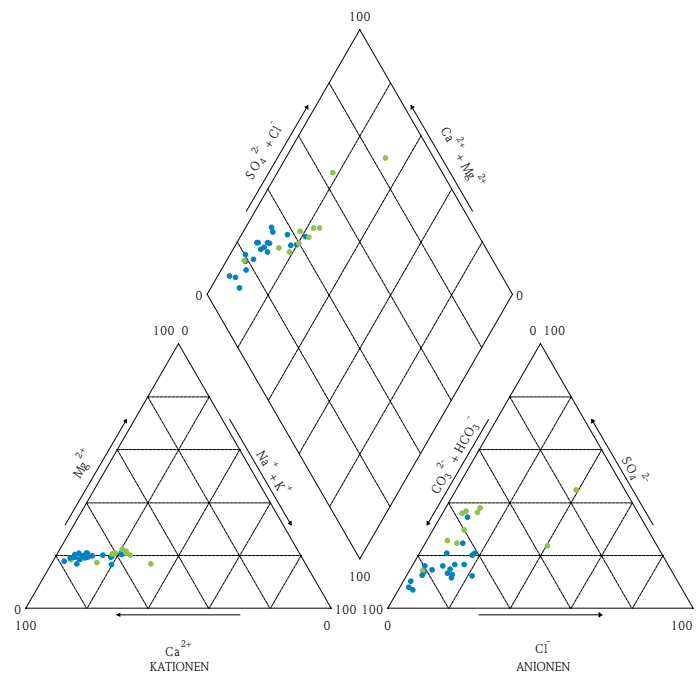
die Gesamtkonzentrationen der Erdalkalien um den Faktor 10 variieren. Im Gegensatz dazu zeigen die Alkalien eine sehr viel geringere Konzentrationsspannweite (Abb. 5.28). Die Cl-Werte weisen im Vergleich zu den Alkali-Metallen eine relativ hohe Spreizung auf, wobei die der flachgründigen Quellgrundwässer etwas größer ist als die der tiefgründigen Grundwasservorkommen aus Brunnen. WAGNER et al. (2003) führen erhöhte Cl-Konzentrationen in Grundwässern aus kristallinen Gesteinen überwiegend auf anthropogene

Beeinflussung zurück. Es muss darüber hinaus aber auch von einer geogenen Cl-Komponente ausgegangen werden, etwa durch die Mobilisierung von Flüssigkeitseinschlüssen aus Mineralkörnern. Eine Cl-Senke, etwa durch den Einbau von Cl in Tonminerale, den

Verwitterungsprodukten der Granite (BUCHER & STOBER 2000), ist durch Na : Cl-Verhältnisse größer 1 bei gleichzeitig fehlender Alkalisierung nahezu ausschließlich für flachgründige Grundwässer angezeigt.



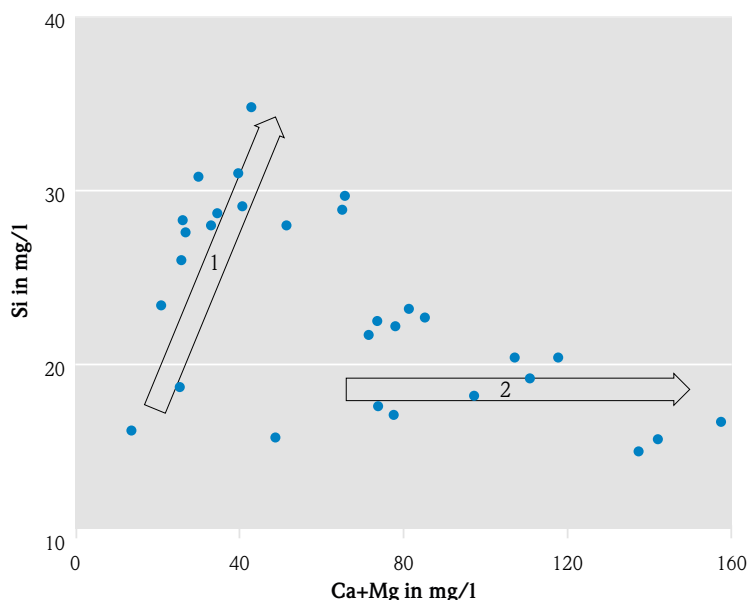
**Abb. 5.28:** Konzentrationsverteilung der gelösten ionaren Hauptinhaltsstoffe in den Grundwässern des Kristallinen Odenwaldes (SCHOELLER-Diagramm, Linienfarbe blau = Brunnen, grün = Quellen)



**Abb. 5.29:** Darstellung der Ionenbeziehungen zwischen gelösten Anionen und Kationen in den Grundwässern des Kristallinen Odenwaldes (PIPER-Diagramm, Punktfarbe blau = Brunnen, grün = Quellen)

Ein Teil der untersuchten Grundwässer weist eine deutliche Korrelation der Ionenkonzentration von Ca + Mg mit der Konzentration gelösten Siliciums (Si) auf, die auf die Verwitterung silikatischer Minerale, z.B. Anorthit und Biotit, und deren Alteration zu Tonmineralen zurückzuführen ist (s. Abb. 5.30). Eine geringe oder fehlende Korrelation von Ca + Mg und Si ist dagegen auf die Mobilisierung von Ca, Mg sowie  $\text{HCO}_3$  aus einer Löss- bzw. Lösslehm-Überdeckung zurück zu führen. Diese Grundwässer zeichnen sich im Vergleich zur chemischen Beschaffenheit der Wässer, die durch silikatische Gesteinslösung geprägt werden, zudem durch deutlich höhere Gesamtlösungsinhalte aus.

Grundwässer, die vorwiegend durch die Lösung der Silikatminerale geprägt wurden, sind auf den zentralen und östlichen Bereich des Kristallinen Odenwaldes ohne Lössüberdeckung beschränkt. In der Übersichtskarte des hydrogeologischen Teilraums (Abb. 5.31) werden diese Wässer durch das zentral platzierte Kreisdiagramm der ionaren Grundwasserzusammensetzung repräsentiert. Das weiter nordwestlich gelegene Kreisdiagramm verdeutlicht den Einfluss der Lössüberdeckung.



**Abb. 5.30:** Streuung des Verhältnisses von Ca + Mg zu Si. Die Pfeile zeigen in grober Näherung die unterschiedlichen hydrogeochemischen Entwicklungspfade der Grundwässer: Pfad 1 beschreibt die Entwicklung bei dominierender silikatischer Verwitterung, Pfad 2 kennzeichnet bei niedrigen Si-Konzentrationen dominierende Carbonatlösung.

Die überwiegend silikatisch geprägten Grundwässer sind mit Gesamthärten von 2,1–10,1 °dH meist als sehr weich bis weich einzustufen. Die pH-Werte liegen zwischen 6,3 und 7,5 im schwach sauren bis schwach basischen Bereich (Abb. 5.31). Eine zusätzliche Carbonatlösung aus Lössschichten führt

zu einer deutlichen Aufhärtung der Wässer, die mit Gesamthärten von 7,6–24,2 °dH ziemlich hart bis hart sind. Die pH-Werte von 6,7–7,2 liegen im nahezu neutralen Bereich. Die Diversität der Gesamthärten bestätigt frühere Untersuchungen von DIEDERICH & MATTHESS (in: KUPFAHL et al. 1972).

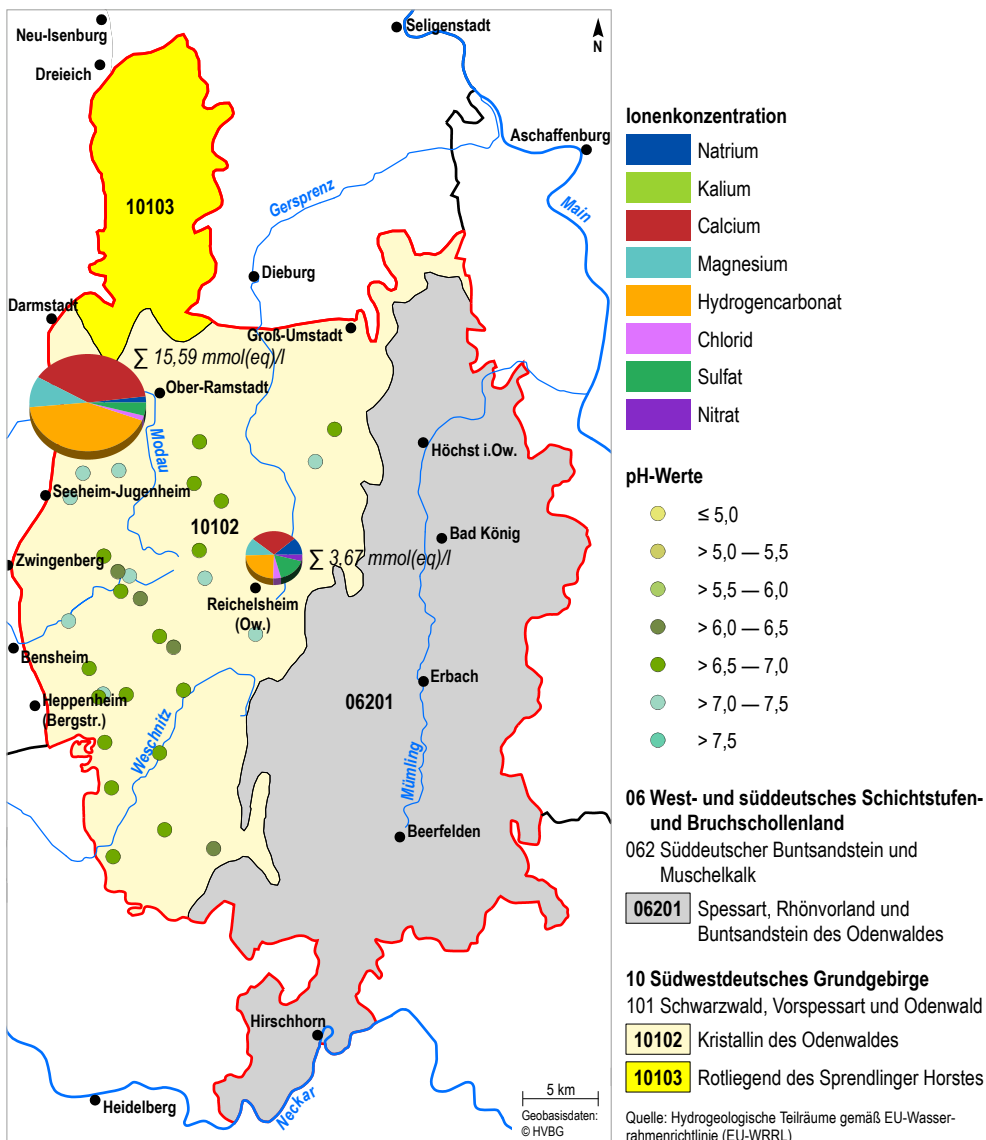


Abb. 5.31: Lage der 30 Beprobungspunkte für den Teilraum Kristalliner Odenwald mit pH-Werten der Grundwässer und typischer ionarer Zusammensetzung (Kreisdiagramme) sowie Gesamtmineralisation (Größe der Kreisdiagramme)

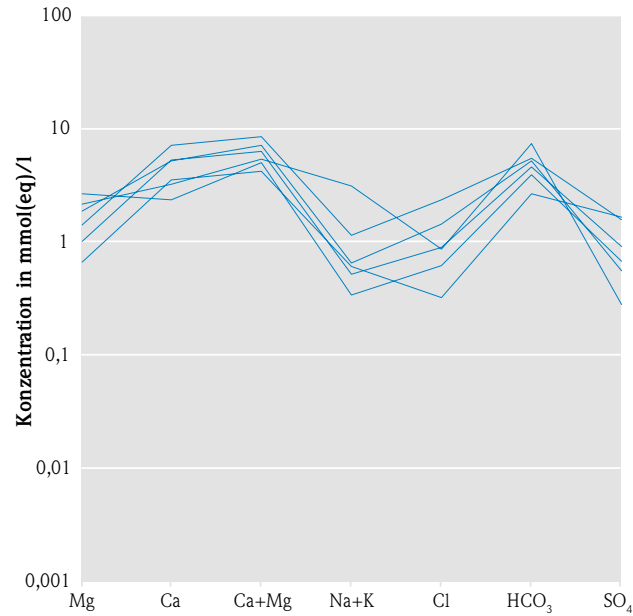
### 5.6.4 Grundwässer des Spremlinger Horstes (Rotliegend)

Die Rotliegend-Grundwässer des Spremlinger Horstes entsprechen vorwiegend dem Ca-(Mg-)HCO<sub>3</sub>-Typ (Abb. 5.33) und spiegeln überwiegend die Lösung des carbonatischen Bindemittels und der carbonatischen Schichtglieder wider. Wie im südlich angrenzenden Teilraum des Kristallinen Odenwaldes zeigt sich auch ein deutlicher Einfluss des aus dem Oberrheingraben eingewehten Löss auf die Grundwasserbeschaffenheit (Abb. 5.34). Die Konzentrationen von Na, K und Cl sind gegenüber Mg, Ca und

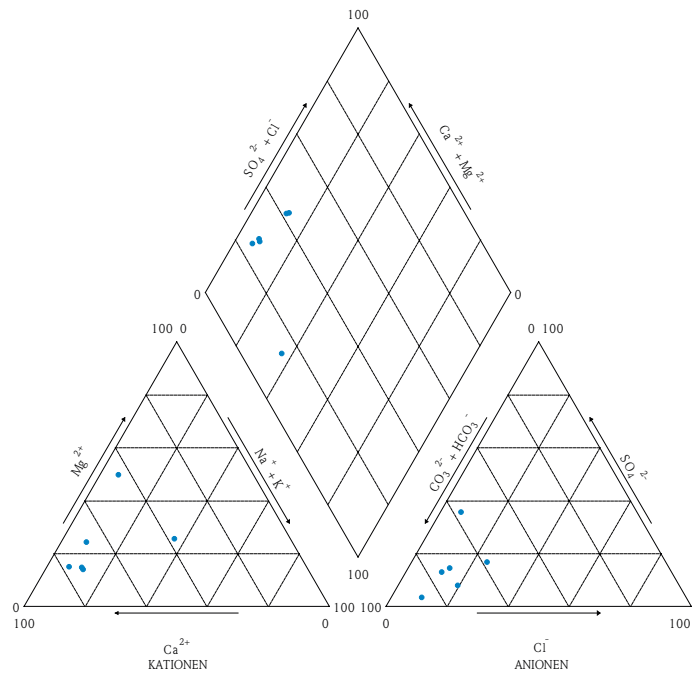
HCO<sub>3</sub> um den Faktor 10 geringer. Auffällig sind hohe Ca : Mg-Verhältnisse größer 5 : 1, die ein Indiz für die dominierend calzitische Ausprägung des carbonatischen Bindemittels sind. Einzelne Wasserproben zeigen eine mögliche Alkalisierung durch Kationenaustausch mit dem teilweisen Austausch von Ca und Mg gegen Na (Ca-Na-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typ). Die Verbreitung toniger Schichtglieder und die z. T. tonige Beschaffenheit des Bindemittels der Sandsteine bietet für den Kationenaustausch eine reaktive Oberfläche

und lässt ihn für die Bildung des beschriebenen Grundwassertyps plausibel erscheinen. Der vereinzelt auftretende Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>-Typ belegt weniger die Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen mit den Rotliegend-Sedimentgesteinen als vielmehr eine maskierte hydrogeochemische Grundwassergene

innerhalb intrudierter Basalte und den späteren Übertritt in den Rotliegend-Grundwasserleiter. Diese von REUL (in: DIEDERICH & EHRENBERG 1977) für den Spessart beschriebene Beobachtung tritt auch in anderen hydrogeologischen Teilräumen in Erscheinung.



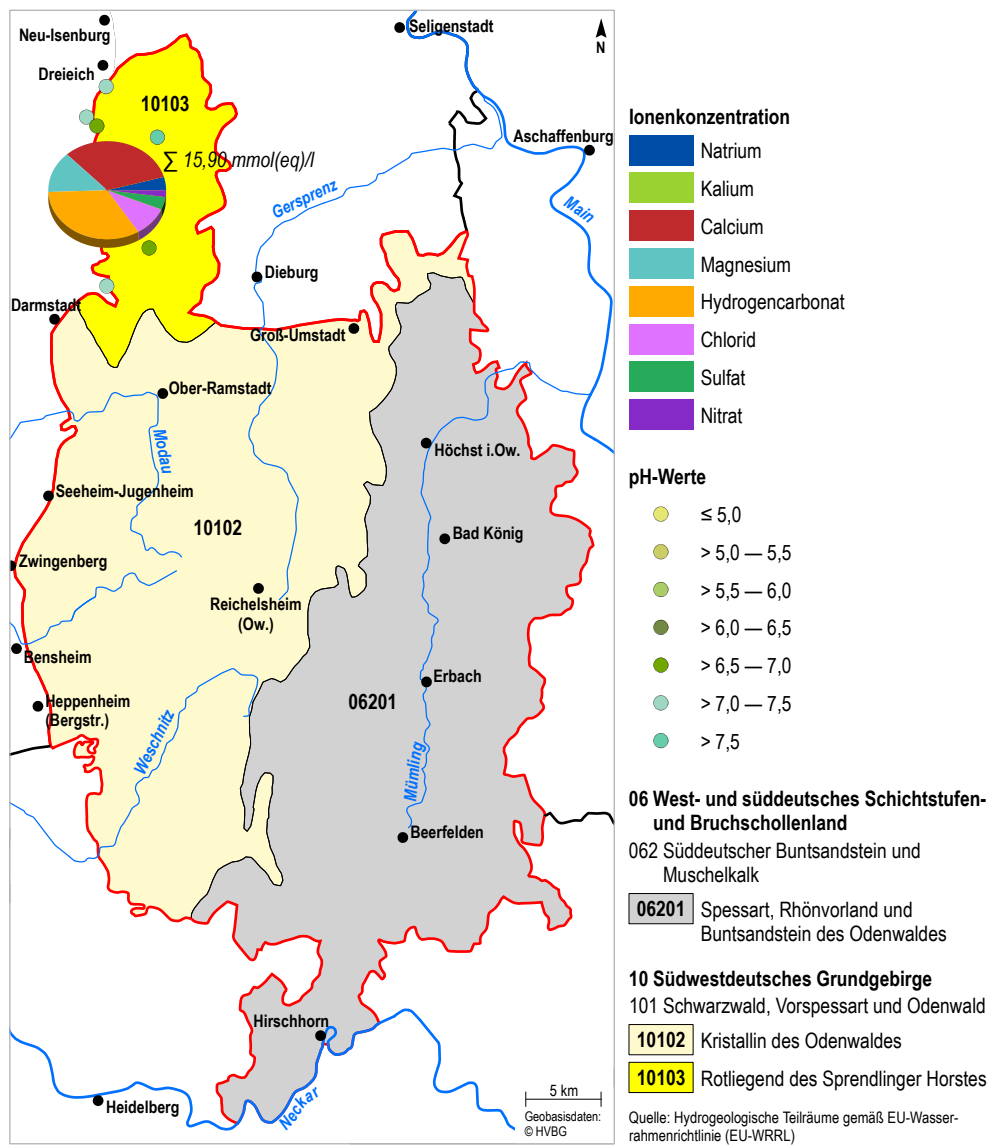
**Abb. 5.32:** Konzentrationsverteilung der gelösten ionaren Hauptinhaltsstoffe in den Grundwässern des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) (SCHOELLER-Diagramm)



**Abb. 5.33:** Darstellung der Ionenbeziehungen zwischen gelösten Anionen und Kationen in den Grundwässern des Sprendlinger Horstes (Rotliegend) (PIPER-Diagramm)

Die beprobten Grundwässer sind generell als ziemlich hart bis hart mit Gesamthärten von 12,4–25,2 °dH einzustufen. Die pH-Werte liegen mit Werten von 6,8–7,6 im neutralen bis leicht basischen Bereich

(Abb. 5.34). Es ist von einer überwiegend carbonatischen Pufferung auszugehen, die durch die Lösung kalkhaltiger Gesteinskomponenten verursacht wird.



**Abb. 5.34:** Lage der sechs Beprobungspunkte für den Teilraum Sprendlinger Horst (Rotliegend) mit pH-Werten der Grundwässer und typischer ionarer Zusammensetzung (Kreisdiagramm) sowie Gesamtmineralisation (Größe des Kreisdiagramms)

### 5.6.5 Flächenhafte Betrachtung der Verteilung von Gesamthärte, Sulfat und Nitrat

Die nachfolgenden Übersichtsdarstellungen stammen aus dem Grundwasserbeschaffenheitsbericht 2012 (HLUG 2013) und wurden durch Regionalisierung aus den Daten verschiedener Messnetze des landesweiten Grundwassermonitorings generiert, die in der hessischen Grundwasserdatenbank (GruWaH) gesammelt werden.

Bei der flächenhaften Darstellung der Grundwasser-Gesamthärten (Abb. 5.35) zeichnet sich der hydrogeologische Teilraum Buntsandstein-Odenwald durch besonders weiche Wässer deutlich ab. Die Sandsteine

enthalten nur wenig lösliche Inhaltsstoffe, die zur Aufhärtung und zur Erhöhung der Gesamtmineralisation der Grundwässer beitragen könnten. Die erhöhten Gesamthärten der Grundwässer am westlichen und nördlichen Randbereich des Kristallinen Odenwaldes sowie im Bereich der Rotliegend-Gesteine des Sprendlinger Horstes sind auf Löss- bzw. Lösslehm-Überdeckungen zurückzuführen, die aus dem Oberrhein-graben eingeweht wurden. Der Kristalline Odenwald ist flächenhaft durch weiche bis mittelharte Grundwässer geprägt, im Teilraum Sprendlinger Horst (Rotliegend) dominieren mittelharte bis harte Grundwässer.

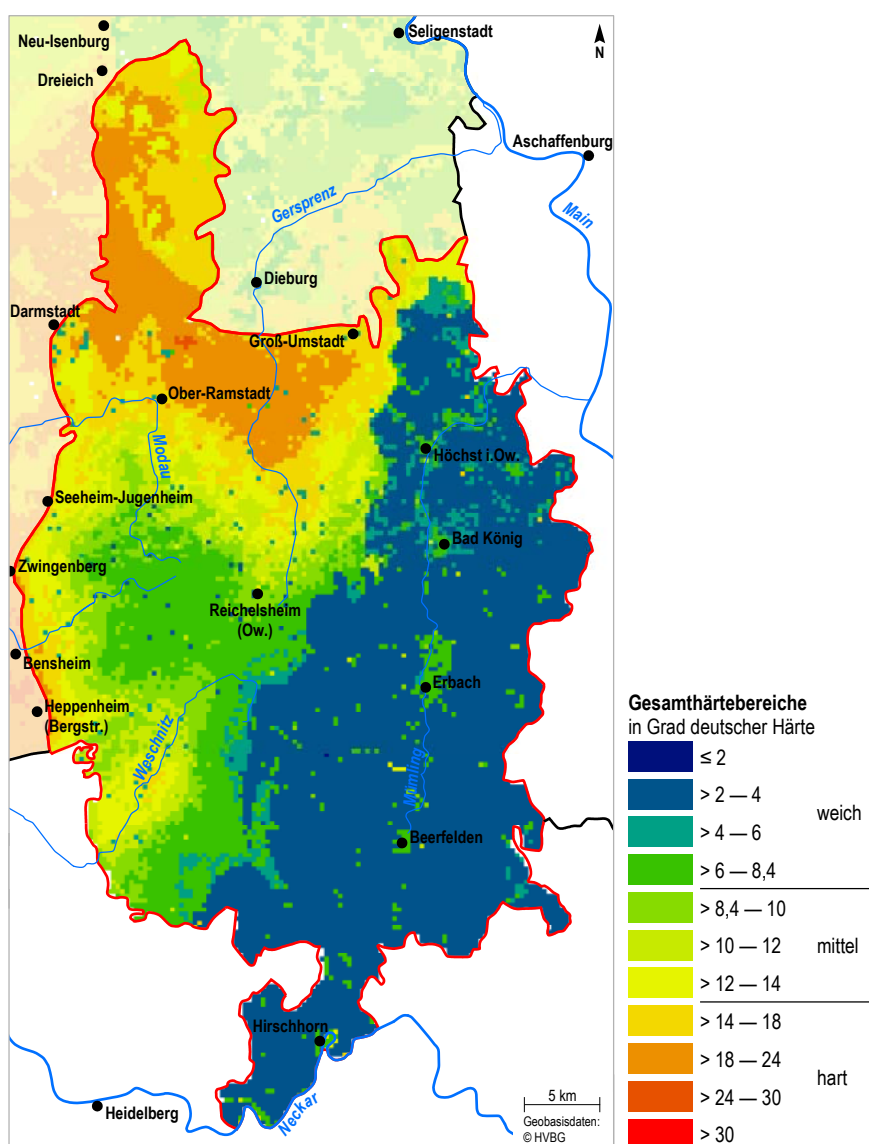


Abb. 5.35: Übersichtskarte mit einer flächenhaften Darstellung der Grundwasser-Gesamthärten

Erhöhte Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser sind im Wesentlichen auf diffuse Stickstoffeinträge aus der landwirtschaftlichen Flächennutzung sowie atmosphärische Stickstoffeinträge zurückzuführen. Im Boden angereicherter Stickstoff kann bei der Grundwasserneubildung als Nitrat oder Ammonium in das Grundwasser verlagert werden. Bei reduzierenden

Milieuverhältnissen im Grundwasser können Stickstoffverbindungen durch Denitrifikation zu gasförmigen Stickstoffverbindungen und elementarem Stickstoff umgesetzt werden. Je nach Art der ablaufenden Denitrifikation werden als Reaktionsprodukte  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  und/oder Fe und Mn freigesetzt.

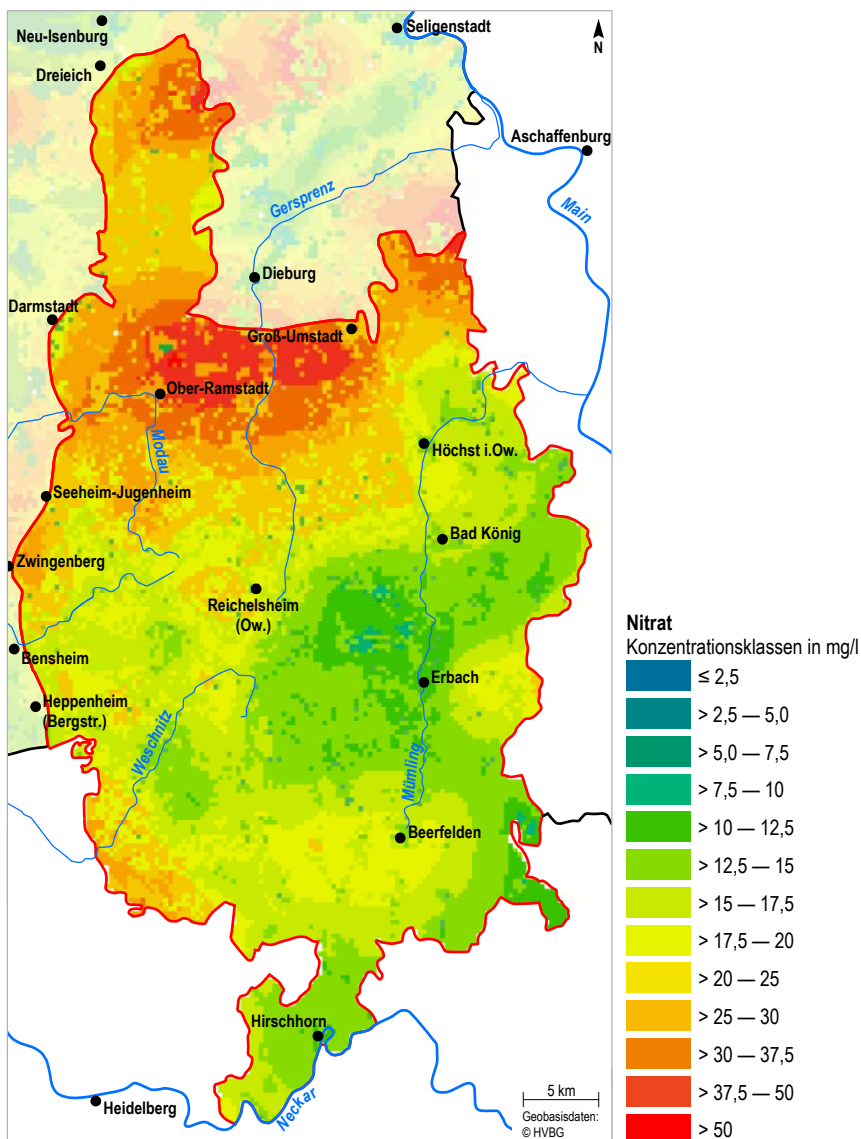


Abb. 5.36: Übersichtskarte mit einer flächenhaften Darstellung der Nitrat-Konzentrationen des Grundwassers



Die Übersichtskarten zu den flächenhaften Nitrat- und Sulfat-Konzentrationen (Abb. 5.36 und Abb. 5.37) verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Flächennutzung und Nitrat- bzw. Sulfat-Konzentrationen im Grundwasser. Die landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen im nördlichen Bereich der hydrogeologischen Teilräume des Odenwaldes treten durch

erhöhte Nitrat- und Sulfat-Konzentrationen hervor. In den überwiegend bewaldeten Gebieten des zentralen Buntsandstein-Odenwaldes und des Kristallinen Odenwaldes sind die Konzentrationen hingegen deutlich geringer (siehe auch Abb. 2.5: Landnutzung im Bearbeitungsgebiet).

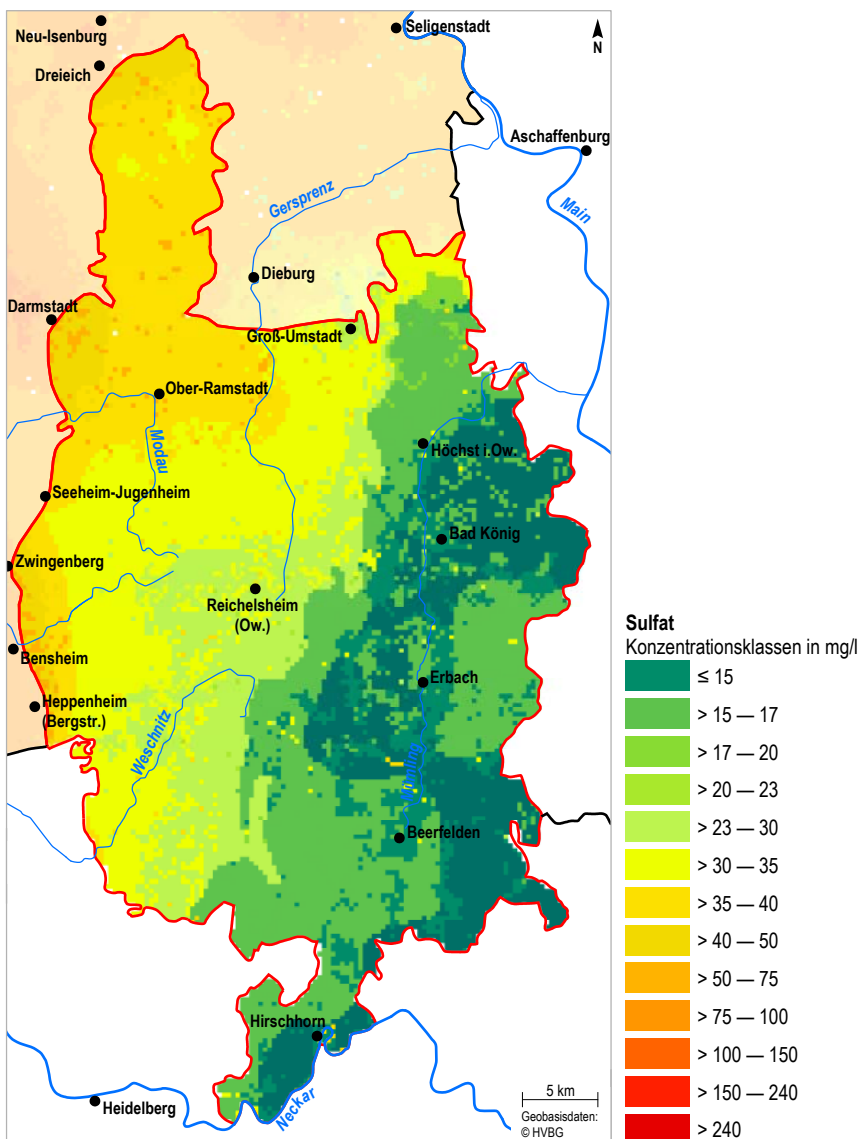


Abb. 5.37: Übersichtskarte mit einer flächenhaften Darstellung der Sulfat-Konzentrationen des Grundwassers

### 5.6.6 Spurenstoffe

Die Spurenstoff-Konzentrationen wurden für alle Grundwasserproben untersucht, deren ionare Hauptinhaltsstoffe in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben wurden (insgesamt 72 Grundwässer).

Spurenstoffe sind chemische Elemente, die im Grundwasser mit Konzentrationen deutlich unter 1 mg/l auftreten. In der Regel liegen die Konzentrationen bei wenigen µg/l, können jedoch auch bei einigen Elementen mehrere 100 µg/l betragen. Bei den hier untersuchten Spurenstoffen handelt es sich um Aluminium (Al), die Halbmetalle Antimon (Sb), Arsen (As) und Selen (Se), die Übergangsmetalle Titan (Ti) und Zirkonium (Zr) sowie die Metalle und Schwermetalle Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Blei (Pb), Gallium (Ga), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Silber (Ag), Thallium (Tl), Uran (U), Vanadium (V), Zink (Zn) und Zinn (Sn). Zudem wurden die Konzentrationen der Lanthanoide, der Seltenen-Erden-Elemente, bestimmt.

Die Bestimmungsgrenze der durchgeführten Analysen liegt für die meisten Elemente bei 0,5 µg/l. Davon abweichend sind die Bestimmungsgrenzen von Cd (0,08 µg/l), Cu, Ni, und Ti (1,0 µg/l), Cr (1,5 µg/l), Al (3,0 µg/l), Se (5 µg/l) und Zn (10 µg/l).

Die Mobilität und die damit zusammenhängenden Konzentrationen vieler Spurenstoffe im Grundwasser sind unmittelbar abhängig von der physikalischen und chemischen Beschaffenheit des Grundwassers. Der pH-Wert sowie das Redoxpotential des Grundwassers haben einen maßgeblichen Einfluss darauf, in welchem Maße und in welcher Spezies die jeweiligen Spurenstoffe in Lösung gehen können (z. B. MCLEAN & BLEDSOE 1992, PHILIPS 1999). Besonders ausgeprägt ist dies bei Elementen, die amphotere Eigenschaften aufweisen wie z. B. Al, As, Cr oder Sb.

Untersuchungen von LUDWIG (2011) im Bereich des Buntsandstein-Odenwaldes und des Rotliegendes Sprendlinger Horstes ergaben, dass die Konzentrationen von gelösten Spurenstoffen im Grundwasser nicht zwangsläufig mit der Verfügbarkeit der entsprechenden Elemente im Gestein des Grundwasserleiters zusammenhängen. Neben Mineral-Lösungs- und Ausfällungsprozessen können die Konzentrationen vieler Spurenstoffe auch durch Sorption an Tonmineralen oder Eisenhydroxiden sowie durch Remobilisierung in erheblichem Maße beeinflusst werden (BODIN et al. 2003).

#### 5.6.6.1 Spurenstoffe in Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes

Die oberflächennahen Grundwasservorkommen im Buntsandstein-Odenwald weisen zum Teil sehr niedrige pH-Werte auf (minimal 4,5). Mit bis zu 900 µg/l wurden in den Grundwässern teilweise sehr hohe Al-Konzentrationen gemessen. Hohe Al-Konzentrationen in Verbindung mit niedrigen pH-Werten werden als ein Indiz für eine Versauerung des Grundwassers interpretiert (QUADFLIEG 1990, KÄMMERER 1998). Niedrige pH-Werte begünstigen die Mobilität von zahlreichen Schwermetallen, die bei neutralem oder basischem pH-Wert an sorptiven Oberflächen wie z. B. an Tonmineralen oder Eisenoxiden und Hydroxiden gebunden werden. Dies gilt insbesondere für Cu und Pb, die bereits bei pH-Werten größer 6 durch Sorption nahezu vollständig demobilisiert werden. Hohe Cu- und die höchste Pb-Konzentration des gesamten Datensatzes (2,6 µg/l bzw. 1,4 µg/l) sind in

Buntsandstein-Grundwässern mit pH-Werten kleiner 5 ermittelt worden. Mit Ausnahme von Zink (33 µg/l) liegen sämtliche ermittelten Spurenstoffkonzentrationen unterhalb von 10 µg/l. Ni war in über 50 % der untersuchten Proben nachweisbar. Der Medianwert lag bei 1,7 µg/l, der Maximalwert bei 8,4 µg/l.

Co-, Cu-, Ti- und Sn-Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze konnten in einem Drittel der Proben nachgewiesen werden. Bei den Elementen As, Sb, Pb, Cd, Cr, U, V und Zn lagen jeweils 90 % der Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die Maximalwerte betragen wenige µg/l. Die Konzentrationen der Elemente Ga, Se, Ag, Tl und Zr lagen bei sämtlichen untersuchten Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze.

### 5.6.6.2 Spurenstoffe in Grundwässern des Kristallinen Odenwaldes

Die Grundwässer des Kristallinen Odenwaldes weisen meist nahezu neutrale pH-Werte zwischen 6,3 und 7,5 auf. In diesem pH-Wertbereich ist die Löslichkeit von Al im Gegensatz zu sauren oder alkalischen pH-Werten sehr niedrig (KÄMMERER 1998). Die Al-Konzentrationen sind daher meist gering, mit einem Höchstwert von 44,2 µg/l. Das entspricht einem Zwanzigstel des Maximalwerts in den sauren Buntsandsteinwässern. Mit Ausnahme von Zn (30,5 µg/l) und U (15,5 µg/l) liegen die Maximalwerte der anderen analysierten Elemente unter 5 µg/l. Pb und Cu wurden in geringeren Konzentrationen nachgewiesen als in den sauren Buntsandstein-Grundwässern. In den Kristallin-Grundwässern lagen lediglich 10 % der Cu-Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze gegenüber 25 % bei den Buntsandstein-Wässern, was die be-

günstige Mobilität von Cu bei niedrigen pH-Werten widerspiegelt (LUDWIG 2011).

Ti war in sämtlichen analysierten Grundwasserproben nachweisbar. Die Varianz der Messwerte ist gering (min. 1,25 µg/l; max. 4,17 µg/l). In mehr als 50 % der untersuchten Grundwässer konnten U und V nachgewiesen werden. Mit Ausnahme eines Einzelwerts für U (15,5 µg/l) lagen die Werte zwischen 0,5 und 3 µg/l. Die Konzentrationen der Elemente As, Pb und Sn lagen bei rund 25 % der analysierten Grundwässer über der Bestimmungsgrenze. Die Maximalwerte betragen wenige µg/l. 90 % der Messwerte für die Elemente Sb, Cr, Cu und Zn lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Sämtliche Analysewerte der Elemente Cd, Ga, Se, Ag, Tl und Zr lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

### 5.6.6.3 Spurenstoffe in Grundwässern des Sprendlinger Horstes (Rotliegend)

Die untersuchten Grundwässer im Bereich des Sprendlinger Horstes weisen weitgehend neutrale pH-Werte auf (6,8 bis 7,6). Der Wert des einzigen Positivnachweises für Al lag im Bereich der Bestimmungsgrenze (4,9 µg/l). Im Gegensatz zu den Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes und des Kristallinen Odenwaldes sind die Grundwässer in der Rotliegend-Abfolge teils erheblich sauerstoffreduziert. In den sauerstoffarmen Grundwässern wurden relativ hohe Konzentrationen an gelöstem Eisen nachgewiesen, die wiederum mit den höchsten ermittelten As-Werten der Untersuchungen korrelieren (Maximalwert 24,8 µg/l). Gemäß LUDWIG (2011) könnte dies auf eine Remobilisierung von zuvor an Eisenhydroxiden adsorbiertem As hindeuten.

In sämtlichen Analysen konnte Ti nachgewiesen werden, die Konzentrationen lagen in einem ähnlichen

Bereich wie bei den Grundwässern im Kristallinen Odenwald (1,6 bis 3,6 µg/l). In 5 von 6 Grundwasserproben wurde U mit einem Maximalwert von 61 µg/l nachgewiesen. Als Ursache für erhöhte Urangehalte können die unter Kapitel 5.6.5 beschriebenen diffusen Stickstoffeinträge in Frage kommen. Dabei weisen erhöhte Eisen- und Sulfatkonzentrationen auf autotrophe Denitrifikation im Grundwasser hin welche laut BERK & FU (2017) unter bestimmten Bedingungen zu erhöhten Urangehalten führen kann. Auch die Elemente Cr und V wiesen verhältnismäßig hohe Maximalwerte auf (8,0 bzw. 8,8 µg/l). Für die Elemente Sb, Pb, Co, Cu, Ni, Sn und Zn wurden jeweils 1 bzw. 2 Positivnachweise erbracht. Die Werte lagen dabei im Bereich von weniger als 5 µg/l mit Ausnahme von Zn (55 µg/l). Bei den Elementen Cd, Ga, Se, Ag, Tl und Zr lagen sämtliche Analysewerte unter der Bestimmungsgrenze.

#### 5.6.6.4 Seltene-Erden-Elemente in Grundwässern

Die Gruppe der Lanthanoide umfasst die Elemente Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb) und Lutetium (Lu).

Das instabile Element Pm wurde im Rahmen der Analysen nicht bestimmt. Gemeinsam mit den radioaktiven Aktinoiden zählen die Lanthanoide zur Gruppe der Seltenen-Erden-Elemente (SEE). Da in der Literatur der Begriff „SEE“ (Seltene Erden Elemente) häufig allein für die Bezeichnung der nicht radioaktiven, stabilen Lanthanoide verwendet wird, wird auch nachfolgend lediglich auf diese Gruppe Bezug genommen.

Die Lanthanoide treten in der Natur ausschließlich als dreiwertig geladene Kationen auf. Sie können allerdings elementspezifisch und in Abhängigkeit vom pH-Wert der wässrigen Lösung durch Komplexbildung auch als Carbonato-Komplex ( $\text{LnCO}_3^+$ ) oder als negativ geladener Dicarbonatkomplex ( $\text{Ln}(\text{CO}_3)_2^-$ ) vorliegen (JOHANNESSEN et al. 2005). GUO et al. (2005) führten Untersuchungen zur Löslichkeit von Spurenstoffen in Grundwässern durch und setzten dabei die ermittelten Konzentrationswerte ins Verhältnis zur Häufigkeit der jeweiligen Elemente im Gestein. Die geringsten Löslichkeiten weisen dabei neben den Spurenstoffen Al und Zr auch die SEE auf. Sie konnten dabei für die Wasser-Gesteins-Konzentrationsverhältnisse der SEE eine steigende Tendenz mit zunehmender Ordnungszahl bzw. abnehmendem Ionenradius feststellen.

Die Untersuchungen der Grundwässer ergaben lediglich für die SEE La, Ce, Nd, Gd und Dy in einzelnen

sauren Grundwässern im Buntsandstein Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze von  $0,5 \mu\text{g/l}$ . Im Gegensatz zu diesen Sedimentgesteinen weisen kristalline Gesteine im Mittel wesentlich höhere Konzentrationen an SEE auf (JOHANNESSEN et al. 2005, GUO et al. 2005). In den Grundwässern des Kristallinen Odenwaldes lagen jedoch bei sämtlichen untersuchten Grundwässern die SEE-Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze. Es ist daher vielmehr davon auszugehen, dass über die geogene Verfügbarkeit der SEE hinaus zusätzlich pH-Wert, Komplexbildung und Sorption an Mineraloberflächen einen wesentlichen Effekt auf die Mobilität der SEE im Grundwasser haben.

Als Fazit ist festzustellen, dass Spurenelementkonzentrationen oft nur lokal auftreten und erheblich von den Redoxbedingungen und dem pH-Wert des Wassers beeinflusst werden. Das Verhältnis der Elementverfügbarkeit im Gestein zur Konzentration im Grundwasser wird überlagert von Sorptions- und Desorptionsprozessen als eine Funktion des pH-Werts. Das Redoxpotential hat erheblichen Einfluss auf die Stabilität von sorptiven Oberflächen wie Eisenhydroxiden. Unter reduzierenden Bedingungen können diese mit gleichzeitiger Mobilisierung zuvor adsorbierter Spurenstoffe in Lösung gehen. Als Beispiel kann Vanadium sowohl primär aus Basaltintrusionen gelöst als auch aus sekundären Anreicherungen an Eisenhydroxiden remobilisiert werden. Die hohen Al-Konzentrationen in den Grundwässern des Buntsandstein-Odenwaldes stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den niedrigen pH-Werten der Grundwässer und spiegeln keine höhere Verfügbarkeit in den Sedimenten des Buntsandsteins gegenüber den kristallinen Gesteinen oder den Sedimenten des Rotliegend wider.

### 5.7 Isotopenhydrologische Grundwasseruntersuchungen

Die Analyse der stabilen Wasserisotope  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  in natürlichen Proben wie Niederschlag, Grundwasser, Schnee, Eis oder Süßwasser lässt Rückschlüsse auf gegenwärtige und frühere Transportprozesse in der Atmosphäre und die Klimageschichte zu. Dabei ist davon auszugehen, dass die isotopische Fraktionierung stets als Gleichgewichtstrennung abläuft und der Prozess so langsam vonstatten geht, dass

keine kinetischen Effekte auftreten, bei denen noch die unterschiedliche Diffusivität der einzelnen Isotope berücksichtigt werden müsste.

Auf Grund von Fraktionierungsprozessen, die wiederum von Klima- und Umweltfaktoren wie z. B. der Temperatur abhängen, werden leichte und schwere Isotope unterschiedlich weit transportiert (Isotopen-

fraktionierung). Wird eine Wasserprobe vom Wasserkreislauf in tiefen Grundwässern oder in von Gestein umschlossenen wassergefüllten Poren abgeschlossen, so kann sie die zur Zeit des Abschlusses herrschenden Bedingungen als Klimaarchiv konservieren. Eine besondere Rolle spielt hierbei die Meteoric Water Line (MWL), bei der Deuterium- und  $^{18}\text{O}$ -Gehalt von verschiedenen Proben gegeneinander aufgetragen werden und aus der u. a. das atmosphärische Luftfeuchte-defizit oder die Niederschlagshäufigkeit zur Zeit des Probenabschlusses ermittelt werden können.

Die stabilen Wasserisotope und ebenso das radioaktive Tritium werden außerdem als natürlich oder künstlich eingebrachte Tracer verwendet, um beispielsweise Sommer- und Winterniederschläge im Bodenwasser voneinander zu unterscheiden. Auch sind Rückschlüsse auf das Wasseralter und die Einzugsgebietsgröße möglich.

Die verwendeten stabilen Isotope sind hauptsächlich Isotope der Elemente:

- Wasserstoff (H),
- Kohlenstoff (C),
- Stickstoff (N) und
- Sauerstoff (O)

Seltener verwendet:

- Schwefel (S), Bor (B), Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ),
- hauptsächlich ein häufiges Isotop ( $^1\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ )
- ein oder zwei stabile schwerere Isotope ( $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )
- ein radioaktives Isotop ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ )

Verwendet werden die Verhältnisse der Isotope und deren Veränderung aufgrund natürlicher Prozesse.

Im Herbst 2003 und im Herbst 2004 sowie im Frühjahr 2005 wurden an 52 Probenahmestellen (Abb. 5.51) Grundwasserproben zur Analyse auf stabile ( $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$ ), radioaktive Isotope ( $^3\text{H}$ ), zur Wasserdatierung mit der Tritium- $^3\text{He}$ -Methode sowie zur Bestimmung von im Wasser gelösten Edelgasen entnommen und ausgewertet (FRIEDRICH 2007).

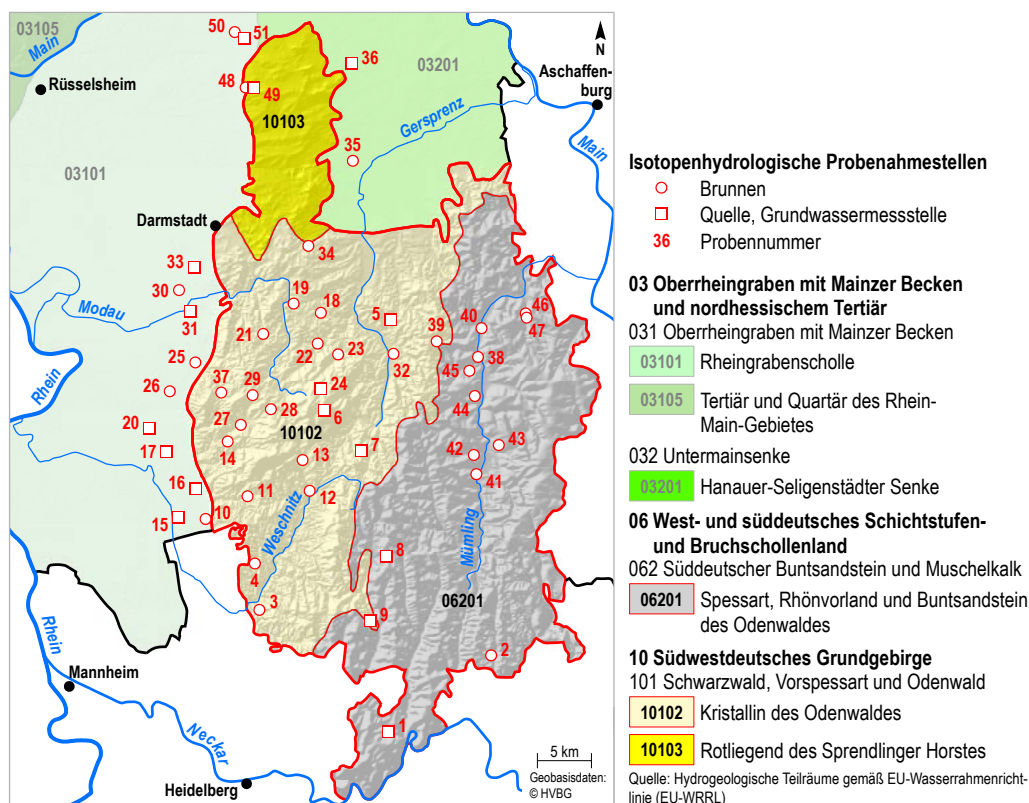


Abb. 5.38: Isotopenhydrologische Probenahmestellen (FRIEDRICH 2007)

## 5.7.1 Stabile Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs

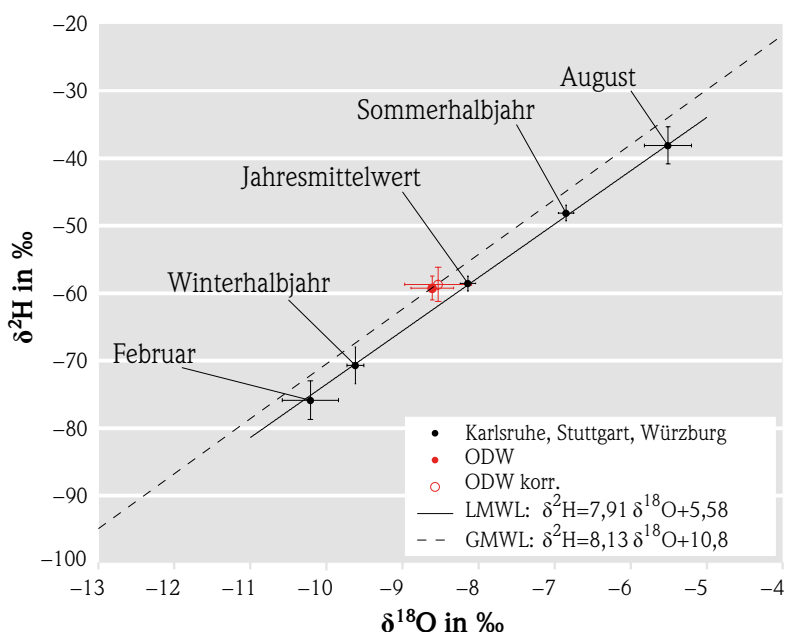
### Jahreszeitliche Einordnung der Grundwasserneubildung

Die Anteile der schweren stabilen Isotope des Wasserstoffs ( $^2\text{H}$  = Deuterium) und des Sauerstoffs ( $^{18}\text{O}$ ) variieren in meteorischen Wässern aufgrund von temperaturabhängigen Isotopentrenneffekten bei der Verdunstung und Kondensation. Dies führt unter anderem zu saisonalen Schwankungen der Isotopenverhältnisse<sup>1</sup> im lokalen Niederschlag, so dass der Niederschlag im Winter isotopisch leichter ist als im Sommer. Ein anderer Effekt ist die isotopische Abreicherung des Niederschlags beim sukzessiven Ausregnen der an Gebirgsrändern aufsteigenden feuchten Luftmassen. Der Niederschlag in größerer Höhe ist daher isotopisch leichter als in der Ebene (Höheneffekt). Die beschriebenen Isotopenvariationen im Niederschlag spiegeln sich in dem daraus gebildeten Grundwasser wider. Für die Niederschläge in Mitteleuropa ist dieser Zusammenhang durch  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$  (sogenannte mittlere Niederschlagsgerade) beschrieben.

In Abb. 5.39 ist die Global Meteoric Water Line (GMWL) nach ROZANSKI et al. (1993) sowie die für Niederschlagsdaten von den in ähnlichen geogra-

fischen Höhen und im Umkreis von ca. 150 km liegenden Stationen Karlsruhe, Stuttgart und Würzburg gültige Local Meteoric Water Line (LMWL) für die isotopische Fraktionierung der Grundwasserproben durch den Höheneffekt dargestellt. Die leichte Verschiebung der LMWL gegenüber der GMWL zeigt den Einfluss lokaler Gegebenheiten.

In dieser Grafik wurde auch der mittlere  $\delta^2\text{H}$ -Gehalt gegen den mittleren  $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt der Grundwasserproben aus dem Odenwald (ODW) aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Grundwässer im Odenwald relativ nahe beim Jahresmittelwert der Niederschlagsdaten von Karlsruhe, Stuttgart und Würzburg, mit leichter Tendenz zum Winterniederschlag, liegen. Nach FRIEDRICH 2007 liegen die Maxima der Niederschläge im Untersuchungsgebiet im Januar/Februar, Juni/Juli und Oktober/November. Weiterhin ergibt sich, dass im Bereich des Odenwaldes keine signifikante Isotopenfraktionierung der Niederschläge durch Evaporation stattfindet.



**Abb. 5.39:** Mittlere Isotopengehalte der Grundwasserproben aus dem Odenwald (ODW) im Vergleich mit charakteristischen Niederschlagswerten (Mittelwerte aus drei Stationen); (LMWL = Local Meteoric Water Line, GMWL = Global Meteoric Water Line) (FRIEDRICH 2007)

<sup>1</sup> Die Isotopenverhältnisse (z. B.  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) werden bezogen auf das Isotopenverhältnis eines Meerwasser-Standards angegeben (sogenannte  $\delta$ -Notation).

## Einzugsgebietscharakterisierung (Einzugsgebietshöhen)

Der Höheneffekt im Niederschlag führt zu einer Anreicherung der schweren Isotope mit zunehmender Höhe. Luftmassen, die auf Gebirge treffen werden gehoben und kühlen ab, was zu einer stärkeren Fraktionierung während des Kondensationsprozesses führt.

Für die Berechnung der Höhenabhängigkeit der Niederschlagsisotopie wurden drei Stationen südlich des Odenwaldes (Neuherberg 489 m NN, Garmisch 720 m NN und Hohenpeissenberg 977 m NN) verwendet. Die Korrektur der Höhenabhängigkeit der Niederschläge ergibt einen Höheneffekt des  $\delta^{18}\text{O}$  für die Niederschläge des Odenwaldes von  $\delta^{18}\text{O} = -0,0025 \cdot \text{Höhe} - 7,8$ . Damit kann eine Abschätzung der mittleren Infiltrationshöhen (Einzugsgebietshöhen) für die Grundwasserproben erfolgen.

Abb. 5.40 aus (FRIEDRICH 2007) zeigt die  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopieverhältnisse der Grundwässer aus der Beprobung vom Herbst 2003 im Vergleich zur Höhe der Probenahmestellen für Grundwasserproben aus dem Kristallin, dem Buntsandstein, dem Hessischen Ried und der Hanau-Seligenstädter Senke. Hier werden die Proben aus dem Hessischen Ried ausgewertet.

Die Probenahmestellen des Hessischen Riedes lagen in einem Höhenbereich von ca. 90 m ü. NN bis 170 m ü. NN und weisen entsprechend der gefundenen Isotopenverhältnisse auf Einzugsgebietshöhen zwischen 140–420 m ü. NN und damit auf den Kristallinen Odenwald hin.

Die Proben der Messstellen 10, 15 und 17 gruppieren sich sehr eng, was entsprechend der Gerade für den Höheneffekt auf eine Quellregion in ca. 140 m ü. NN hinweist und der Höhenlage des nahen Odenwaldrandes entspricht.

Das niedrigste Isotopenverhältnis wurde an der Messstelle 16 mit  $\delta^{18}\text{O} = -7,8 \text{ ‰}$  ermittelt. Die Untersuchung von Grundwasser ca. 25 km südwestlich Heppenheims zeigt eine ähnliche Isotopie von  $\delta^{18}\text{O} = -7,9 \text{ ‰}$ , was ein Hinweis darauf ist, dass das Grundwasser dieser Probe nicht oder nur zu einem geringen Teil im Odenwald gebildet wurde. Die Zusammenschau der Lage der Messstellen 10, 15, 16 und 17 und der lokalen Grundwasserfließverhältnisse tendenziell parallel zum Odenwaldrand bestätigt dies.

Alle im Kristallin gewonnenen Grundwasserproben zeigten  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopieverhältnisse  $< 8,3 \text{ ‰}$ . In Grundwasserproben aus dem Hessischen Ried lagen die  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopieverhältnisse der meisten Proben, ausgenommen die der Messstellen 10, 15, 16 und 17, ebenfalls in diesem Bereich. Für diese Messstellen liegt das Grundwasserneubildungsgebiet in Höhen zwischen 256 und 412 m ü. NN, also im Kristallinen Odenwald.

Um den Anteil des im Odenwald gebildeten Grundwassers quantifizieren zu können, wird eine einfache lineare Zweikomponentenmischung nach  $P_m = X P_K + (1-X) \cdot P_{HR}$  berechnet. Lokal infiltriertes Grundwasser des Hessischen Rieds trägt eine bestimmte charakteristische Eigenschaft  $P_{HR}$ , Wasser aus dem Kristallin die Eigenschaft  $P_K$ .

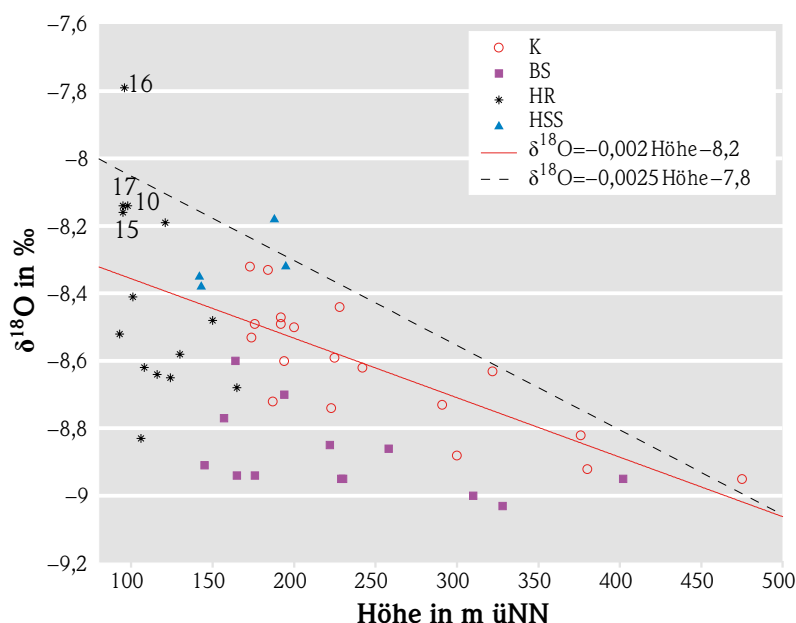
Für die vom Kristallin kaum beeinflussten Bereiche des Hessischen Rieds beträgt  $\delta^{18}\text{O} = -7,8 \text{ ‰} = P_{HR}$ . Das mittlere  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopieverhältnis  $P_K$  des im Kristallinen Odenwald in Richtung des Hessischen Rieds infiltrierten Grundwassers beträgt  $\delta^{18}\text{O} = 8,6 \text{ ‰} = P_K$ , wobei nur Isotopieverhältnisse verwendet wurden, bei denen die sich ergebende Höhe des Infiltrationsgebietes im Anstrom der Messstelle auch tatsächlich vorhanden ist. Das Mischwasser im Abstrom des Odenwaldrandes hat Isotopieverhältnisse zwischen 7,8 und 8,9 ‰.

Damit errechnet sich für die untersuchten Messstellen in grober Näherung ein Anteil des Grundwassers aus dem Kristallin von

- 30 % für die Messstellen 10, 15, 16, 17 und
- 80 % für die Messstellen 20, 25, 26, 30, 33.

Verallgemeinert bedeutet das, dass der Zustrom von Grundwasser aus dem Kristallinen Odenwald von Norden nach Süden hin abnimmt. Qualitativ deckt sich dies mit den Angaben des Grundwasserbewirtschaftungsplanes Hessisches Ried aus dem Jahre 1999 (Regierungspräsidium Darmstadt (RPDA) 1999).

Mit dieser Methode kann allerdings nicht bestimmt werden, in welchem Umfang es sich dabei um einen unterirdischen Randzufluss handelt und wie groß der Anteil ist, der über Vorfluter ins Hessische Ried gelangt und dort versickert, da sich diese beiden Komponenten in ihrer Isotopensignatur nicht unterscheiden.



**Abb. 5.40:**  $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse der untersuchten Grundwasserproben (K = Kristalliner Odenwald, BS = Buntsandstein-Odenwald, HR = Hessisches Ried, HSS = Hanau-Seligenstädter-Senke) in Abhängigkeit von der Höhe der Probenahmestellen (FRIEDRICH 2007)

### 5.7.2 Tritium- $^3\text{He}$ -Datierung

Das radioaktive schwere Wasserstoff-Isotop  $^3\text{H}$  (Tritium) hat eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Tritium wurde vor allem durch die oberirdischen Wasserstoffbombentests in den Jahren 1950–1963 in die Atmosphäre und damit in den Wasserkreislauf eingetragen. Die maximalen Tritium-Konzentrationen im Niederschlag („Bomben-Peak“) waren rund 500–1.000-mal höher als der natürliche Hintergrundwert. Abb. 5.41 zeigt die für das Bearbeitungsgebiet rekonstruierte Tritium-Eintragsfunktion. Durch den immer flacher werdenden Verlauf seit Mitte der 1990er Jahre wird die Altersbestimmung junger Grundwässer zunehmend schwieriger. Ist ein signifikant geringer Tritium-Gehalt vorhanden, ist der Anteil an altem Grundwasser entsprechend hoch und das Grundwasseralter > 45 Jahre.

Eine relativ genaue Datierung der jüngeren, tritiumhaltigen Grundwässer ist durch die zusätzliche Messung des stabilen Zerfallsprodukts  $^3\text{He}$  (Helium-3) möglich. Das Wasseralter wird dann mit Hilfe des radioaktiven Zerfallsgesetzes aus der gemessenen Tritium-Konzentration und der durch den Tritium-Zerfall produzierten  $^3\text{He}$ -Menge berechnet.

Anhand der Messung der im Wasser gelösten Edelgase (Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon) wurde zusätzlich überprüft, ob Störungen des Gashaushalts der Grundwasserprobe vorliegen, z. B. durch Ausgasungen bei der Probennahme oder Gas-Überschuss aufgrund von Lufteinschlüssen in der ungesättigten Bodenzone bei der Infiltration. Damit konnte die Qualität der Daten zur Tritium- $^3\text{He}$ -Datierung überprüft und sichergestellt werden.

Die mit der Tritium- $^3\text{He}$ -Methode ermittelten Wasseralter reichen von wenigen Jahren in den Regionen potenzieller Neubildung auf den Höhen des Odenwaldes bis zu Altern > 45 Jahren im Bereich der Randstörung zum Hessischen Ried. Relativ viele Grundwasserproben aus dem Hessischen Ried waren Mischwässer aus einer jüngeren und einer älteren Komponente.

Im Kristallinen Odenwald nehmen die Grundwasseralter in Richtung Oberrheingraben zu (Abb. 5.42). Dies zeigt, dass Grundwasser aus dem Kristallin des Odenwaldrandes sehr langsam in Richtung Hessisches Ried fließt.



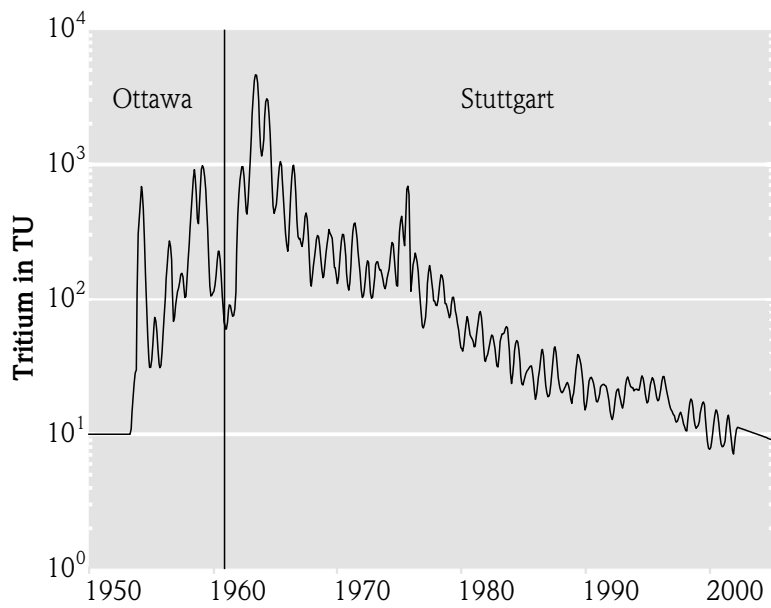


Abb. 5.41: Rekonstruierte Tritium-Eintragsfunktion im Niederschlag des Bearbeitungsgebietes (FRIEDRICH 2007)

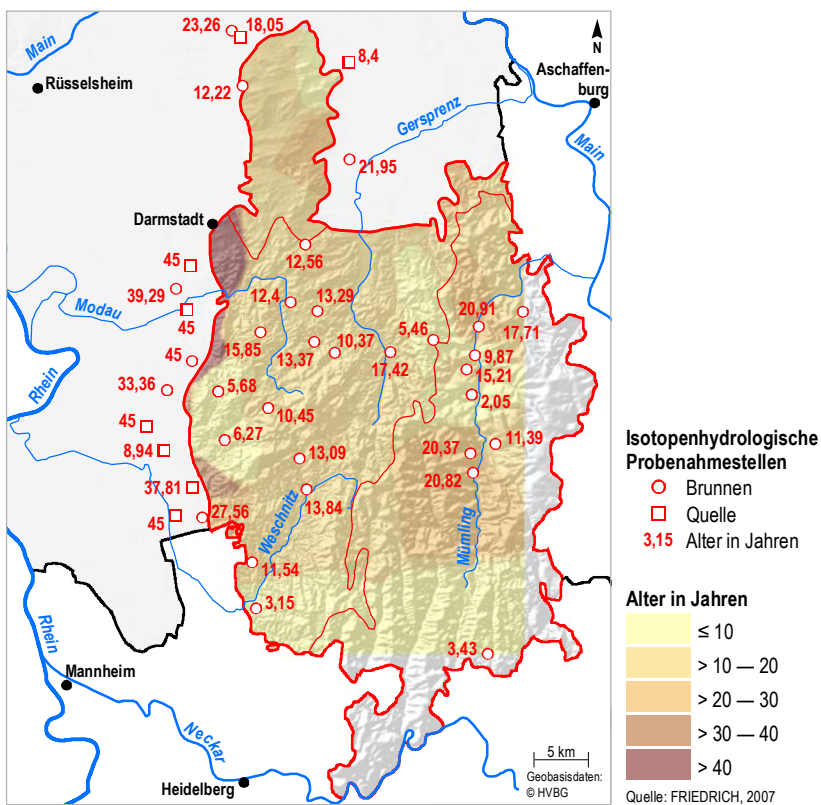


Abb. 5.42: Verteilung der  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Alter (verändert nach FRIEDRICH 2007)

Die mit der Tritium-<sup>3</sup>He-Methode ermittelten Wasseralter sind Punktdaten, ermittelt anhand von Wasserproben aus Brunnen und Grundwassermessstellen, die im Grunde genommen nur bei ausreichender Datendichte flächenhaft ausgewertet werden sollten. Da jedoch ein dazu ausreichender Datenbestand nur schwer zu erreichen ist, wurden die verfügbaren Werte einer kritischen Interpretation unterzogen.

Im Kristallinen Odenwald wurden überwiegend Grundwasseralter zwischen 10 und 20 Jahren ermittelt. Das jüngste Grundwasser (2 Jahre) wurde in einer Wasserprobe aus dem Buntsandstein-Odenwald detektiert. Die ältesten Wässer wurden am westlichen Odenwaldrand mit > 45 Jahre (in der Abb. 5.42 als 45 notiert) gefunden. Ein Zusammenhang zwischen der Tiefenlage der Filterstrecke und dem ermittelten Alter des Grundwassers konnte nicht festgestellt werden.

Im Bereich der Randstörung, die den Nördlichen Oberrheingraben im Osten zum Kristallinen Odenwald hin abgrenzt, wurden ausschließlich ältere Grundwässer (27 bis > 45 Jahre) gefunden. Nur im Bereich des Weschnitztales ist es signifikant jünger (< 10 Jahre).

Ein hohes Grundwasseralter lässt auf eine geringe Fließgeschwindigkeit auf dem Weg vom Entstehungsort bis zum Fundort sowie auf eine geringe Beimischung von Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Bereich des Fundortes schließen.

Weiterhin wurde der Einfluss der Schuttkegel der aus dem Odenwald in das Rheintal fließenden Bäche im Bereich der Bergsträßer Pleistozänterrasse untersucht.

Am Übergang des Odenwaldes zum Rheingraben befindet sich die sogenannte Bergsträßer Pleistozänterrasse. Zuerst liegen dabei nach SCHMITT (1964) die Schuttkegelablagerungen der Odenwaldbäche und darunter stehen vorwiegend vom Rhein und Neckar abgelagerte Sande, Kiese und Tone an. Bei den Schuttkegelablagerungen der Odenwaldbäche handelt es sich um angeschwemmte, örtlich auch um angewehrte Fein- und Mittelsande, denen scharfkantige kristalline Odenwaldgesteinsbrocken, lössartiger Schwemmschluff und echter Löss eingelagert sind. Diese Ablagerungen sind weniger als 50 m mächtig und greifen am Ausgang der Täler so weit ineinander, dass von einem großen, zusammenhängenden Schuttkegel am Odenwaldfuß gesprochen werden kann. Dieser Schuttkegel stößt bei Darmstadt über 5 km weit in die Ebene vor, während weiter südlich im Bereich der Bergsträßer Pleistozänterrasse ein maximal etwa 500 m breites, allerdings sehr langes Schuttkegelband ausgebildet ist.

Wenn im Bereich des Weschnitztales jüngerer Grundwasser im oberen Bereich des Grundwasserleiters gefunden wurde, kann dies auf eine flächig gute Wegsamkeit in der Talauffüllung zurückzuführen sein, die eine Speisung von Wasser aus den Gewässern in den Grundwasserleiter auf dem Fließweg vom Odenwaldrand bis zur Messstelle ermöglicht.

### 5.7.3 Bilanzierung des Grundwasserstroms über die Störungszone zwischen Odenwald und Hessischem Ried

Aufgrund der oben beschriebenen angenommenen Zusammenhänge ist eine Abschätzung des Zuflusses aus dem kristallinen Bergsträßer Odenwald in den Oberrheingraben möglich. Aus den Erfahrungswerten zur Grundwasserhöflichkeit ist bekannt, dass es im Bereich des Bergsträßer Odenwaldes eine Differenz zwischen der theoretisch ermittelten Grundwasserneubildung aus langjährigen Klimadaten und der tatsächlich entnehmbaren Grundwassermenge gibt. Dies weist auf einen Abfluss in tiefere Bereiche (tieferer unterirdischer Abfluss) hin (siehe Abb. 5.44).

Im Folgenden erfolgt eine Differenzierung zwischen dem oberen unterirdischen Abfluss, der oberhalb der grundwasserstauenden Schicht (siehe Kapitel 4.6) erfolgt, und dem tieferen unterirdischen Abfluss, der unterhalb dieser Schicht erfolgt.

Die verwendete Methodik stellt nur eine der möglichen Vorgehensweise dar und soll eine Abschätzung beider Komponenten des unterirdischen Abflusses geben. An dieser Stelle soll auf bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der getroffenen Annahmen und verwendeten Daten hingewiesen werden. Dies betrifft die Abgrenzung des unterirdischen Einzugsgebietes,

die mögliche Vermischung von verschiedenen alten Wässern und die zur Verfügung stehenden Messungen. In der Zusammenschau aller Aspekte ergibt die vorliegende Abschätzung einen Wert für den maximalen oberen unterirdischen Abfluss.

Der obere unterirdische Abfluss  $Q_{ou}$  aus dem Kristallinen Odenwald kann aus der Verteilung der  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Alter der Grundwasserproben aus Messstellen, die bereits im Hessischen Ried, aber nah am Odenwaldrand liegen, und der Berücksichtigung der Grundwasserneubildung im Bereich zwischen Odenwaldrand und der betrachteten Messstelle abgeschätzt werden.

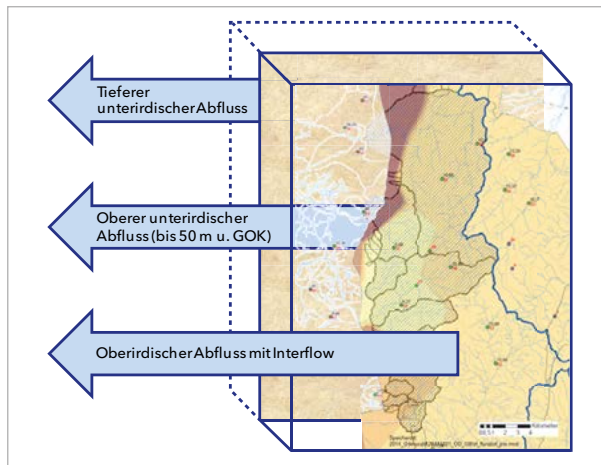


Abb. 5.43: Bilanzierung des westlichen Abstroms aus dem Kristallinen Odenwald

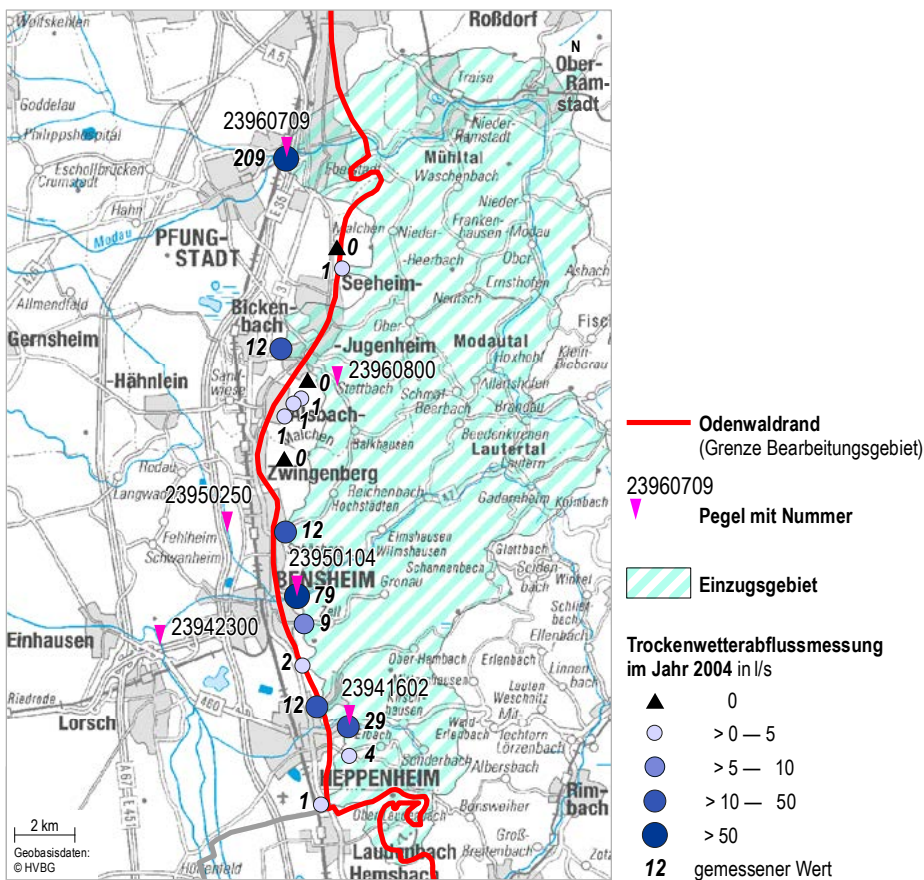


Abb. 5.44: Einzugsgebiet im Kristallinen Odenwald zur Ermittlung der Grundwasserneubildung

Die folgende Abbildung zeigt den Volumenausschnitt für den der obere unterirdische Abfluss abgeschätzt werden soll. Die Fließrichtung zeigt von rechts nach links (von Ost nach West).

Das Grundwasseralter im Odenwald beträgt überwiegend 6 bis 15 Jahre (siehe Tabelle 5.11). Wenn dieses Grundwasser über die Randverwerfung vom Odenwald in den Oberrheingraben übertritt, kommt auf dem Fließweg bis zur Grundwassermessstelle im Oberrheingraben ein Grundwasserneubildungsanteil ( $GWN_{HR}$ ) hinzu (siehe Abb. 5.45 und Abb. 5.46).

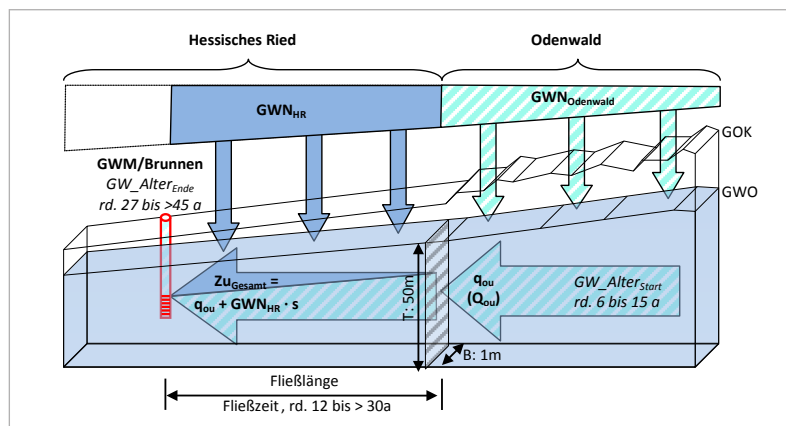


Abb. 5.45: Grundwasserneubildung im Odenwald ( $GWN_{Odenwald}$ ) und im Hessischen Ried ( $GWN_{HR}$ ) mit den resultierenden Grundwasseranteilen ( $Q_{OU}$  bzw.  $q_{ou}$ ,  $GWN_{HR} \cdot s$  und  $Zu_{Gesamt}$ ) und Fließlängen/-zeiten (GW-Alter)

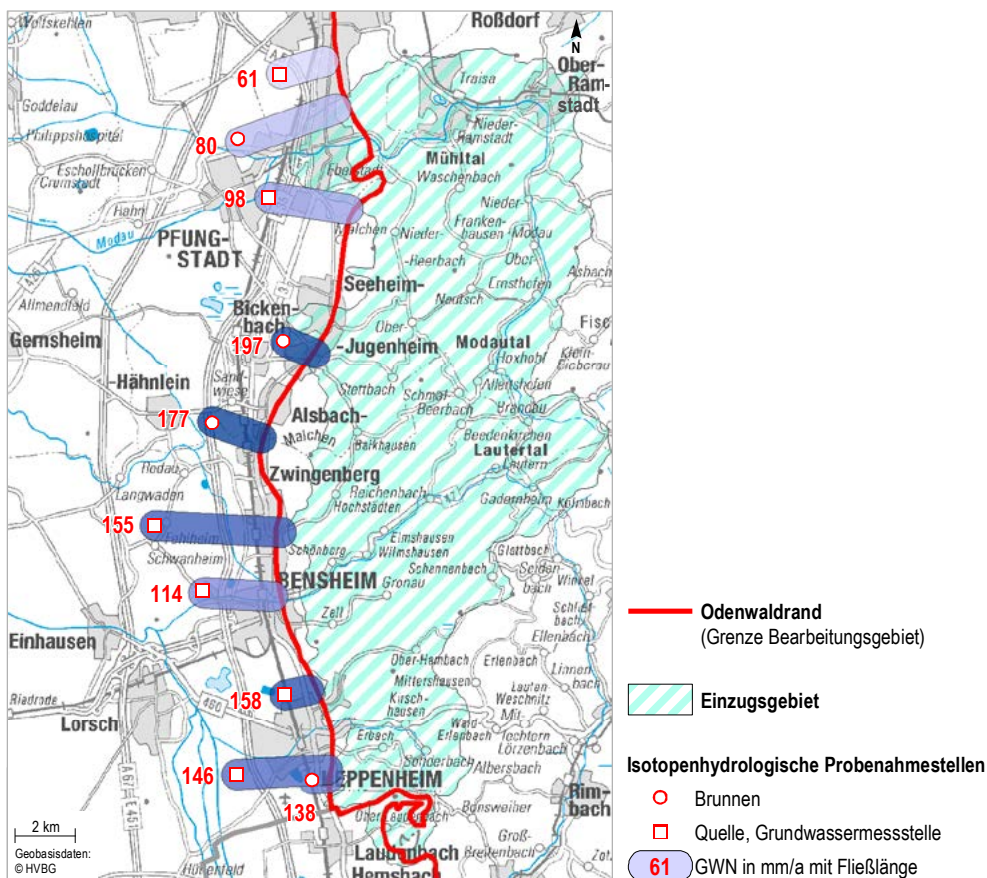


Abb. 5.46: Fließwege und Grundwasserneubildung (GWN) am westlichen Odenwaldrand

Für die Abschätzung des unterirdischen Abflusses wird vereinfachend von einer grundwassererfüllten Mächtigkeit von ca. 50 m ausgegangen. Er kann als spezifischer Grundwasserabstrom  $q_{ou}$  über die Grenzfläche zwischen Odenwaldrand und Hessischem Ried für einen 1 m breiten Streifen berechnet werden.

Der spezifische Zustrom  $q_{ou}$  (pro 1 m Breite) ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gesamten Zustrom am Ort der Messstelle ( $Zu_{Gesamt}$ ) und der über die Fließstrecke ( $s$ ) anfallenden Grundwasserneubildung im Hessischen Ried ( $GWN_{HR}$ , vgl. Abb. 5.45).

$$\begin{aligned} q_{ou} &= Zu_{Gesamt} - (GWN_{HR} \cdot s) \\ &= (v_f \cdot T) - (GWN_{HR} \cdot s) \\ &= (v_a \cdot n_{eff} \cdot T) - (GWN_{HR} \cdot s) \\ &= (s/t \cdot n_{eff} \cdot T) - (GWN_{HR} \cdot s) \\ &= (s/GW\_Alter_{Ende} - GW\_Alter_{Start} \cdot n_{eff} \cdot T) - (GWN_{HR} \cdot s) \end{aligned}$$

mit

$q_{ou}$	spezifischer oberer unterirdischer Durchfluss an der Grenzfläche zwischen Odenwaldrand und Hessischem Ried in $m^3/(a \cdot m)$
$Zu_{Gesamt}$	gesamter Zustrom am Ort der Messstelle in $m^3/(a \cdot m)$
$v_f$	Filtergeschwindigkeit in $m/a$ mit $v_f = v_a \cdot n_e$
$v_a$	Abstandsgeschwindigkeit in $m/a$ mit $v_a = s/t$
$s$	Fließlänge in $m$ (Entfernung vom Odenwaldrand bis zur Messstelle)
$t$	Fließzeit in Jahren ( $a$ ) entsprechend der Differenz zwischen dem $^3H$ - $^3He$ -Alter der Grundwasserproben im Odenwald und dem Hessischen Ried
$GW\_Alter_{Start}$	Grundwasseralter im Odenwald bzw. am Odenwaldrand in $a$
$GW\_Alter_{Ende}$	Grundwasseralter an der Messstelle im Hessischen Ried in $a$
$n_e$	effektive Porosität, dimensionslos in $m^3/m^3$ (hier mit 0,2 angenommen)
$GWN_{HR}$	Grundwasserneubildung im Hessischen Ried in $mm/a$
$T$	Tiefe in $m$

Die Grundwasserneubildung auf der Fläche zwischen Odenwaldrand bis zu den Messstellen wurde aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell jeweils für einen 1 km breiten Streifen berechnet und in diesem gemittelt. Sie beträgt je nach Lage zwischen 61 und 177  $mm/a$  (im Mittel 125  $mm/a$ ). Dies entspricht einem Anteil von 14 bis 60 % bzw. im Durchschnitt 30 % des gesamten Zustroms am Ort der Messstelle ( $Zu_{Gesamt}$ ).

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass im Bereich der Messstellen durchschnittlich ein Anteil von rund

70 % aus dem im Odenwald gebildetem Grundwasser stammt. Der ermittelte Zustrom vom Odenwaldrand für einen 1 m breiten und 50 m tiefen Fließquerschnitt (Stromröhre), korrigiert um die Grundwasserneubildung auf dem Fließweg vom Odenwaldrand zur Messstelle, schwankt zwischen 267 und 1.390  $m^3/(a \cdot m)$  und beträgt im Schnitt 508  $m^3/(a \cdot m)$  (siehe Tabelle 5.11.). Dies unterstützt die Ergebnisse aus Kapitel 5.7.1., wo ein Anteil von 30 bis 80 % des Grundwassers als aus dem Kristallin stammend abgeschätzt wurde.

**Tab. 5.11:** Wasserbilanz am Fließquerschnitt der Messstellen

$GWN_{HR}$	Fließlänge s	$GW_{Alter_{Start}}$	$GW_{Alter_{Ende}}$	Fließzeit t	$v_a$	$v_f$	Filter UK	$Zu_{OD}$	$Zu_{Gesamt}$ (auf 50 m Tiefe)	$GWN_{HR} \cdot s$	Anteil GWN an $Zu_{Gesamt}$	$q_{ou}$
mm/a	m	a	A	a	m/a	m/a	m u. GOK	$m^3/(a \cdot m)$	$m^3/(a \cdot m)$	$m^3/(a \cdot m)$	%	$m^3/(a \cdot m)$
138	509	15	27	12	42,4	8,5	13,8	117	424	70	17	354
146	2990	15	>45	30	99,7	19,9	77,5	1545	997	435	44	561
158	800	15	>45	30	26,7	5,3	60,5	323	267	127	47	140
155	4157	6	>45	39	106,6	21,3	20,1	428	1066	644	60	422
197	1022	15	>45	30	34,1	6,8	26,0	177	341	173	51	167
177	1700	15	33	18	94,4	18,9	20,0	378	944	300	32	644
80	3337	15	39	24	139,0	27,8	153,0	4255	1390	269	19	1121
98	2607	15	>45	30	86,9	17,4	10,0	174	869	255	29	614
61	1460	15	38	23	63,5	12,7	64,2	815	635	89	14	545

Übertragen auf die gesamte Länge der betrachteten Kontaktfläche zwischen kristallinem Odenwald und Hessischem Ried von 32 km ergibt sich damit überschläglich ein unterirdischer Abstrom von  $Q_{uu} = 16,2$  Mio.  $m^3/a$ .

Um das Verhältnis des Zustroms aus dem Odenwald zum Hessischen Ried unabhängig von den betrachteten Messstellen angeben zu können, wurde für das aus diesem Bereich des Odenwaldes zum Rhein hin

abfließende Grundwasser die Abstromfläche zu 190  $km^2$  (Einzugsgebiet siehe Abb. 5.44 und Abb. 5.46) bestimmt und mittels des Bodenwasserhaushaltsmodells (GWN-BW) (siehe Kapitel 5.1.2) die dort stattfindende Grundwasserneubildung mit 148  $mm/a$  (1971–2000) berechnet. Damit werden auf dieser Fläche 28 Mio.  $m^3/a$  Grundwasser neugebildet.

Eine Zusammenfassung der einzelnen Abflussanteile ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tab. 5.12:** Abflussanteile des Einzugsgebietes Bergsträßer Odenwald

	Zufluss	Abfluss
	Mio. $m^3/a$	Mio. $m^3/a$
Grundwasserneubildung GWN ermittelt aus Bodenwasserhaushaltsmodell	28	
oberer unterirdischer Abfluss $Q_{ou}$ (rechnerisch max. möglich) ermittelt aus Altersbestimmung		16,2
unterer unterirdischer Abfluss $Q_{uu} = GWN - Q_{ou}$		11,8

Der auf diese Weise ermittelte obere unterirdische Abfluss aus dem beschriebenen Bereich des Odenwaldes in das Hessische Ried ist größer als der bisher im Teil B des Grundwasserbewirtschaftungsplanes Hessisches Ried aus dem Jahre 1999 vorgestellte Wert (RPDA 1999). Dort wurde für das Grundwasserströmungs-

modell des Hessischen Rieds für diesen Abschnitt des Odenwaldrandes der obere unterirdische Abfluss  $Q_{ou}$  zu 7,032 Mio.  $m^3/a$  abgeschätzt. Dieser Wert stellt für  $Q_{ou}$  möglicherweise die untere Grenze des Wertebereiches dar.

**Tab. 5.13:** Randzustrom aus dem Odenwald und dem Sprendlinger Horst.  
(Auszug aus Tab. 7–2, Teil B des Grundwasserbewirtschaftungsplanes Hessisches Ried, 1999)

Grenzabschnitt	Abschnittslänge	Zustrommenge Grundwasserleiter		Gesamtzustrommenge
		unten	oben	
	m	l/s		$m^3/a$
(von – bis)		unten	oben	
Eberstadt – Jugenheim	13.263	52	104	4.908.529
Jugenheim – Zwingenberg	6.230	10	43	1.669.964
Zwingenberg – Sulzbach	14.104	22	58	2.506.319
<b>Summe</b>	<b>33.597</b>			<b>9.084.812</b>

## 6 Grundwasserbewirtschaftung

### 6.1 Grundwassergewinnung

Abb. 6.1 dokumentiert die Lage und Art der Grundwasser-Entnahmen im Odenwald und Sprendlinger Horst. Zusammen mit den in Kapitel 5.3 gezeigten Darstellungen zu den Wasserentnahmemengen ist der Zusammenhang zwischen der geringen Wasserhöffigkeit im Kristallinen Odenwald mit seinen vielen, aber kleineren Wasserentnahmen (von wenigen 1.000 m<sup>3</sup>/a bis max. ca. 180.000 m<sup>3</sup>/a) und der im Vergleich dazu besseren Wasserhöffigkeit im Buntsandstein-Odenwald mit Entnahmen bis zu

ca. 370.000 m<sup>3</sup>/a (Zahlen jeweils aus 2012) gut zu sehen. Dies spiegelt sich auch in der Verteilung der Entnahmen < 20.000 m<sup>3</sup>/a wider. So gab es davon im Kristallinen Odenwald im Jahr 2012 etwa doppelt so viele wie im Buntsandstein-Odenwald.

Im Sprendlinger Horst sind entsprechend der hydrogeologischen Verhältnisse nur vereinzelte Wasserentnahmen anzutreffen, für das Jahr 2012 sind 7 Gewinnungsanlagen dokumentiert.

### 6.2 Wasserschutzgebiete

#### 6.2.1 Trinkwasserschutzgebiete

Die Festsetzung von Trinkwasserschutzgebieten mit den jeweiligen Wasserschutzgebietsverordnungen stellt ein klassisches Instrument des vorsorgenden Grundwasserschutzes in den Einzugsgebieten der öffentlichen Wasserversorgung dar. Die Wasserschutzgebietsverordnungen regeln durch Ver- und Gebote in den einzelnen Schutzzonen der Trinkwasserschutzgebiete die Einschränkungen oder das Verbot bestimmter Handlungen und Nutzungen. So kann z. B. die Ausbringung von Stickstoffdüngern und Pflanzenschutzmitteln auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen geregelt und dadurch der Eintrag in das Grundwasser verhindert oder minimiert werden.

Ein Trinkwasserschutzgebiet umfasst in der Regel das gesamte unterirdische Einzugsgebiet einer Wasser-

gewinnungsanlage. Da die Gefahr schädigender Einflüsse mit der Annäherung an den Fassungsbereich zunimmt, werden in der Regel drei Zonen (I, II und III) unterschieden, in denen die Schutzanforderungen zum Fassungsbereich (Zone I) ansteigen.

Die Schutzzonen werden in Hessen in Anlehnung an die geltenden Richtlinien des DVGW (2006) vorgeschlagen. Die Beurteilung erfolgt auf Grundlage einer konzeptionellen Beschreibung der hydrogeologischen, geohydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse im Einzugsgebiet sowie unter der Berücksichtigung der vorliegenden technischen Daten der Wassergewinnungsanlage. Die Modellierung der Grundwasserströmung kann hier sinnvoll als Entscheidungshilfe eingesetzt werden.

#### Zone I (Fassungsbereich)

Die Zone I im Nahbereich der Wassergewinnungsanlage soll gewährleisten, dass das Grundwasser in diesem Bereich vor jeglichen Verunreinigungen und Beeinträchtigungen geschützt ist. Die Zone I ist daher durch eine Einzäunung vor unbefugtem Betreten zu sichern. Nach dem DVGW-Arbeitsblatt

W 101 (DVGW 2006) soll die Ausdehnung der Zone I in der Regel bei Brunnen allseits mindestens 10 m und bei Quelfassungen in Richtung des zuströmenden Grundwassers mindestens 20 m betragen. Eine Flächennutzung, gleich welcher Art, ist in der Zone I nicht zugelassen.



## Zone II (Engere Schutzzone)

Die Zone II soll den Schutz des Grundwassers vor Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Viren, Parasiten und Wurmeier) gewährleisten, die bei geringer Fließdauer und -strecke zu der Wassergewinnungsanlage gefährlich sind. Daher soll die Zone II den Bereich der Umgebung

der Wassergewinnungsanlage abdecken, in dem die Fließzeit des Grundwassers 50 Tage oder weniger bis zum Erreichen der Fassung beträgt. Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 101 sollte für die Bestimmung der 50-Tage-Linie zunächst die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ermittelt werden.

## Zone III (Weitere Schutzzone)

Die Zone III soll den Schutz vor weitreichenden Beeinträchtigungen, insbesondere vor nicht oder nur schwer abbaubaren chemischen oder radioaktiven Verunreinigungen gewährleisten. In der Regel umfasst die Zone III das gesamte Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage.

Einen Anhalt zur Bestimmung der Größe des benötigten Einzugsgebiets lässt sich aus der maximal genehmigten jährlichen Entnahmerate und aus der für das Gebiet anzunehmenden mittleren Grundwasserneubildungsspende ableiten. Dabei ist zu berücksichtigen,

dass das im Einzugsgebiet neugebildete Grundwasser nicht zu 100 % der Wassergewinnungsanlage zuströmt. Durch diese Ableitung lässt sich die benötigte minimale Größe eines Trinkwasserschutzgebiets abschätzen. Die tatsächliche Größe des Wasserschutzgebiets bzw. des Einzugsgebiets der Wassergewinnungsanlage wird jedoch primär durch die Fließrichtung des die Wassergewinnungsanlage anströmenden Grundwassers bestimmt.

Die Zone III kann in eine Zone III A und eine Zone III B aufgeteilt werden.

## Nitratklassen

Die in Hessen zur Trinkwassernutzung geförderten Grundwässer haben zu einem Teil erhöhte Nitratkonzentrationen, die zum überwiegenden Teil durch die landwirtschaftliche Flächennutzung im Einzugsgebiet der jeweiligen Wassergewinnungsanlage bedingt sind. Nach der Trinkwasserverordnung liegt der Grenzwert für Nitrat im Trinkwasser bei 50 mg/l. Wasser, das den Grenzwert überschreitet, darf nicht als Trinkwasser genutzt werden. Um einen Anstieg der Nitratkonzentrationen im Grundwasser, das zur Trinkwassergewinnung genutzt wird, zu verhindern bzw. eine Trendumkehr zu erreichen, sind in den entsprechenden Wasserschutzgebieten Maßnahmen umzusetzen. Die Art der Maßnahmen hängt auch von der Höhe der Nitratkonzentrationen ab. Dabei werden drei Klassen unterschieden:

- **Klasse A:** Nitrat-Konzentration im Rohwasser < 15 mg/l

- **Klasse B:** Nitrat-Konzentration im Rohwasser 15–25 mg/l
- **Klasse C:** Nitrat-Konzentration im Rohwasser > 25 mg/l

Entsprechend der Einstufung gelten mehr oder weniger strenge Auflagen für die landwirtschaftliche Landnutzung. In der ganz überwiegenden Zahl der Wasserschutzgebiete, die zur Klasse C gehören, gehen der Wasserversorger und die im Wasserschutzgebiet wirtschaftenden Landwirte eine Kooperation ein. In dieser werden schlagbezogene Maßnahmen zur Reduktion des Nitrat-Eintrags ins Grundwasser festgelegt. Im Frühjahr und im Herbst werden dabei u. a. die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden analysiert. Auf dieser Basis erfolgt eine standort- und pflanzenbezogene Düngung, die einen Austrag von Nitrat in das Grundwasser weitgehend minimieren soll.

## 6.2.2 Heilquellenschutzgebiete

Heilquellenschutzgebiete sollen den quantitativen und qualitativen Schutz der Heilquellen, mit ihren erschlossenen oder natürlich zutage tretenden Grundwässern, gewährleisten.

Der quantitative Schutz soll sicherstellen, dass das Fließsystem, die Ergiebigkeit und die natürlichen Konzentrationen des Heilwassers nicht beeinträchtigt werden. Dabei werden eine innere Zone (Zone A) und eine äußere Zone (Zone B) unterschieden. Nach den

LAWA-Richtlinien (1998) sind für alle Heilquellenschutzgebiete beide Zonen auszuweisen.

Der qualitative Schutz soll eine chemische und hygienische Verunreinigung verhindern. Die Schutzzonen unterteilen sich entsprechend der Trinkwasserschutzgebiete in den Fassungsbereich (Zone I), die engere Schutzzone (Zone II) und die weitere Schutzzone (Zone III). Zone I wird immer ausgewiesen, die Zonen II und III nur bei Bedarf.

### Bildungstypen

Nach den LAWA-Richtlinien (1998) werden Heilquellen in Abhängigkeit von der Größe des Bildungsgebietes, der Tiefe und Überdeckung des Heilwasser-Fließsystems, der mittleren Verweilzeit des Heilwassers im Untergrund, dem Nachweis von Tritium und der Temperatur der Heilwässer in drei verschiedenen Bildungstypen unterteilt.

Zwischen den Bildungstypen kann es Übergänge geben, so dass sich einzelne Heilquellen nicht eindeutig einem Bildungstyp zuordnen lassen. In diesen Fällen sind besondere Aussagen zur Abgrenzung der Schutzzonen und zu den Schutzmaßnahmen zu treffen.

#### Bildungstyp 1

weist ein sehr großes Bildungsgebiet mit Abstandsweiten der äußeren Einzugsgebietsgrenzen über 10 km und einem über 500 m in die Tiefe reichenden Heilwasser-Fließsystem auf. Seine Überdeckung gewährleistet ein von anderen Fließsystemen unbeein-

trächtigtes Strömen in den Formationswasserleitern. Die mittlere Verweilzeit im Untergrund beträgt 50 Jahre und mehr. Die Temperaturen der Heilwässer sind im Vergleich zu üblichen Grundwässern deutlich erhöht. Das Wasser ist tritiumfrei.

#### Bildungstyp 2

stammt aus einem großen Bildungsgebiet mit Abstandsweiten der äußeren Einzugsgebietsgrenzen von mehreren Kilometern bis zum Heilquellenaustritt. Das Heilwasser-Fließsystem liegt in Tiefen bis max. 500 m und ist gekennzeichnet durch mittlere

Verweilzeiten um ca. 50 Jahre. Anteilig können geringe Mengen jüngeren Grundwassers enthalten sein. Die Temperatur des i. d. R. tritiumfreien Wassers ist gegenüber üblichen Grundwässern schwach erhöht.

#### Bildungstyp 3

verfügt über ein kleines bis mittelgroßes Bildungsgebiet von einigen hundert Metern um die Austrittsstelle. Sein Fließsystem liegt meist in geringen Tiefen von weniger als 100 m. Der Anteil an jüngeren

Grundwasser ist hoch. Bei mittleren Verweilzeiten von maximal 30–50 Jahren ist Tritium vorhanden. Die Temperatur des Heilwassers entspricht weitgehend den ortsüblichen Grundwassertemperaturen.

**Tab. 6.1:** Übersicht über die Merkmale für die Erfordernis von Schutzzonen für die Bildungstypen der Heilquellen (LAWA-Richtlinien 1998)

Schutz	Bildungstyp		
	1	2	3
<b>Quantitativer Schutz</b>			
Zone A	+	+	+
Zone B	+	+	+
<b>Qualitativer Schutz</b>			
Zone I	+	+	+
Zone II	-	(+)	+
Zone III	-	(+)	+

- + Schutzzone ist erforderlich
- (+) Schutzzonenerfordernis ist im Einzelfall zu prüfen
- Schutzzone ist nicht erforderlich

### 6.2.3 Wasserschutzgebiete im Bearbeitungsgebiet

Im HLNUG erfolgt die zentrale Erfassung und Darstellung der festgesetzten und im Verfahren befindlichen Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete in Zusammenarbeit mit den Regierungspräsidien.

Bereits Mitte der 1960er Jahre wurden im Bearbeitungsgebiet die durch Quelfassungen genutzten Grundwässer durch Wasserschutzgebiete geschützt. Anfang der 1970er Jahre waren mehr als 40 Wasserschutzgebiete festgesetzt, von denen noch heute 21 im Bestand sind. Insgesamt sind derzeit 248 Wasserschutzgebiete festgesetzt, weitere 58 sind in Planung (siehe Abb. 6.2).

Die Ausweisung des Wasserschutzgebiets für die Heilquelle von Bad König erfolgte im Jahr 1953. Das Heilquellenschutzgebiet für die Odenwald-Quelle befindet sich im Festsetzungsverfahren.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Zahlen und Auswertungen beziehen sich auf den Bearbeitungsstand des HLNUG vom März 2017.

Die Wasserschutzgebiete bedecken etwa 445 km<sup>2</sup>, das sind rund 31 % der Fläche des Bearbeitungsgebiets. Die 766 zur Trinkwasserversorgung genutzten Wassergewinnungsanlagen bestehen aus 584 Quellen bzw. Quelfassungen und 182 Brunnen. Dies wird in Abb. 6.1 durch die unterschiedliche Farbgebung der Gewinnungsanlantentypen, aber auch in der Größe der ausgewiesenen Schutzgebiete in der Abb. 6.2 deutlich. Die Schutzgebiete der Brunnengalerien im Randbereich des Bearbeitungsgebiets sind im Vergleich zu den Quellschutzgebieten deutlich größer.

Die als Schutzzone IIIB ausgewiesenen Flächen im Bereich des Sprendlinger Horstes dienen dem Schutz von Trinkwassergewinnungsanlagen am östlichen Rand des Nördlichen Oberrheingrabens.

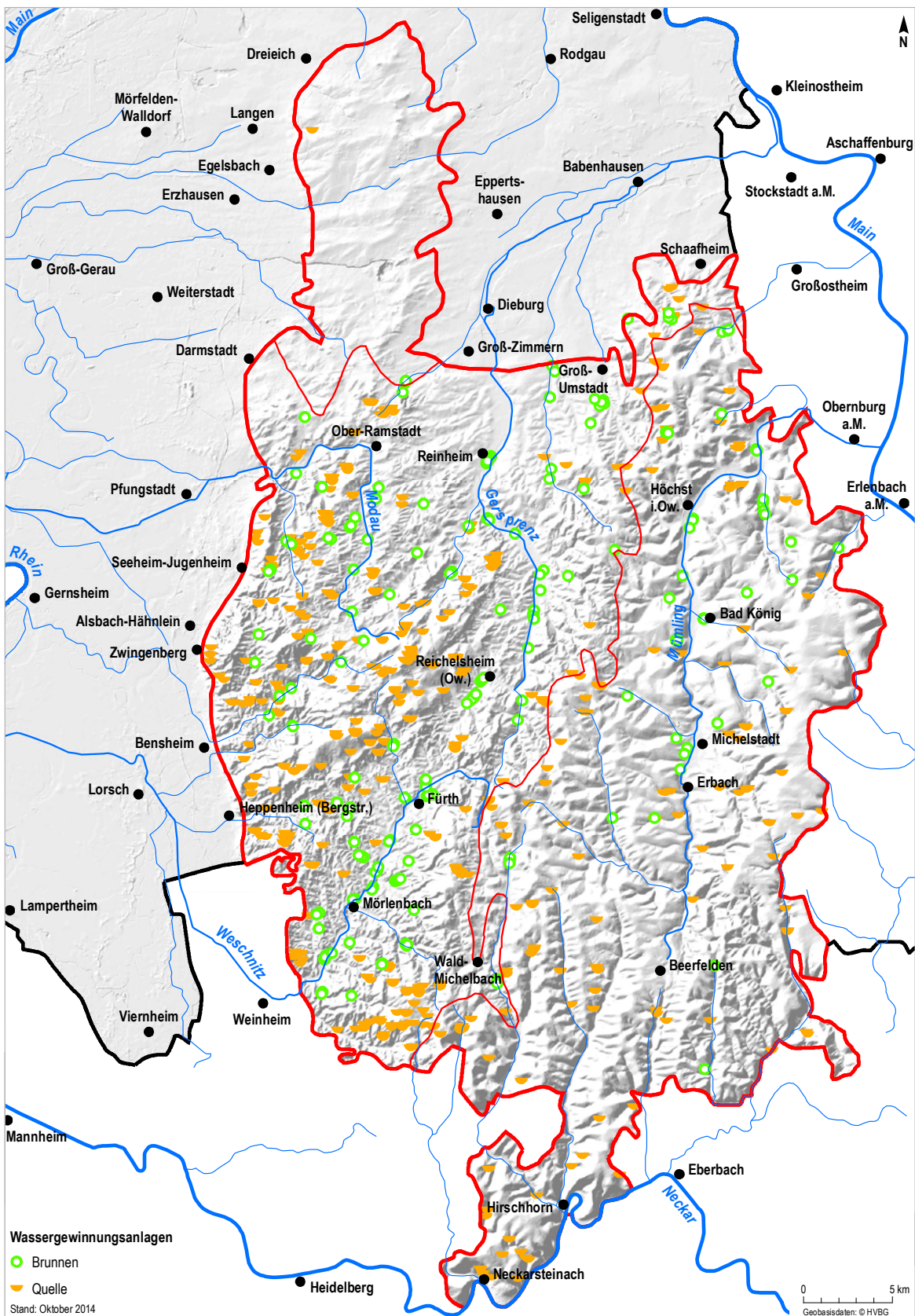


Abb. 6.1: Lage und Art der Grundwasser-Entnahmen

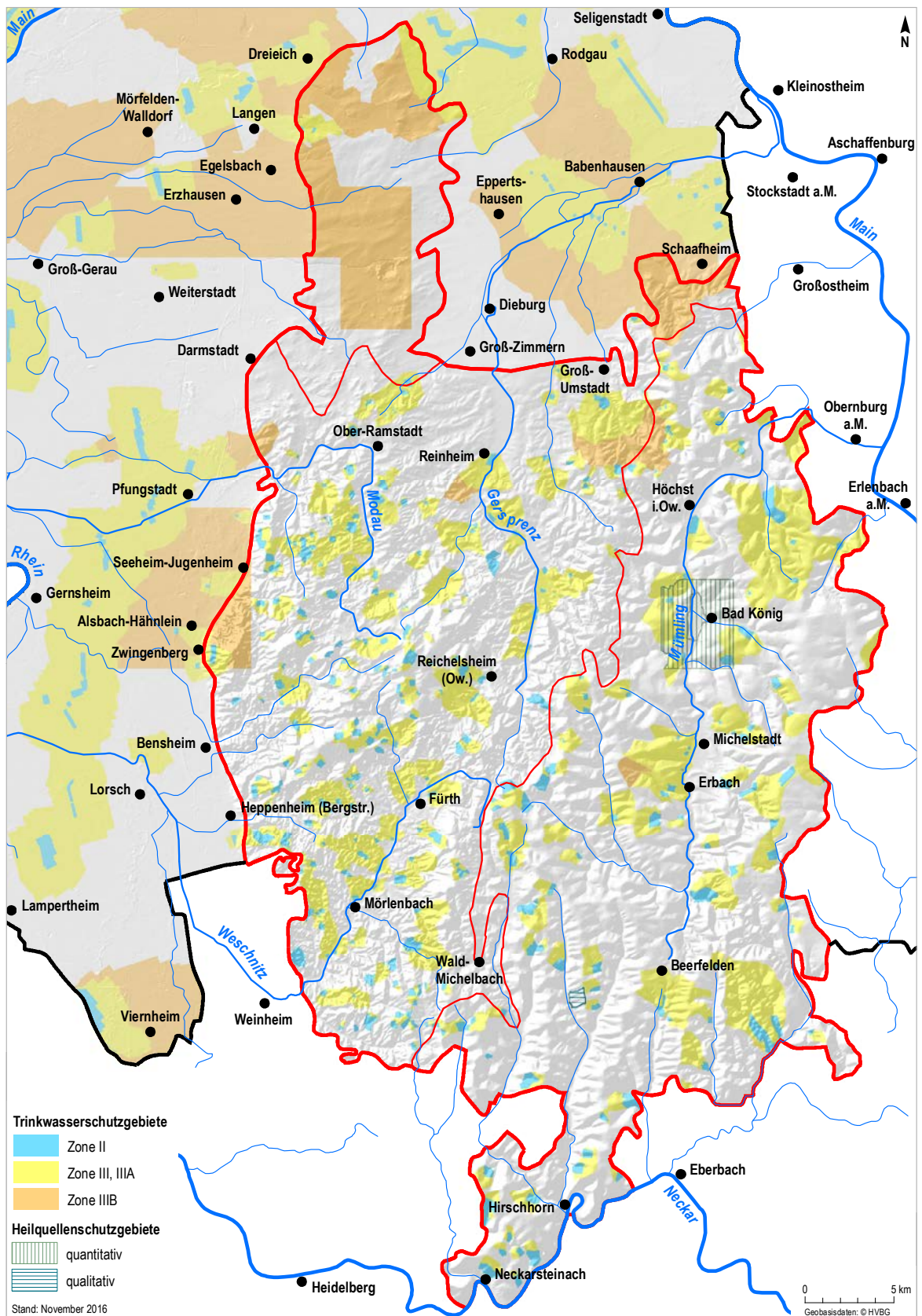


Abb. 6.2: Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete

## 6.3 Maßnahmenräume und Zustand nach EG-WRRL

Die Europäische Union hat mit der seit Dezember 2000 gültigen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000) in allen Mitgliedsstaaten der EU einheitlich geltende Umweltziele für den Schutz des Grundwassers und der Oberflächengewässer aufgestellt und eine rechtliche Basis dafür geschaffen, wie das Wasser zu schützen ist.

Ziel der EG-WRRL ist es, den guten Zustand aller Gewässer zu sichern bzw. zu erreichen. Dabei sind die oberirdischen Gewässer und das Grundwasser als

Einheit flussgebietsbezogen qualitativ und quantitativ zu betrachten.

Wesentliche Instrumente zur Umsetzung der EG-WRRL sind regelmäßig aufzustellende Maßnahmenprogramme und Bewirtschaftungspläne für jedes Flussgebiet. Neben den Zielen und Instrumenten des Umweltschutzes sind auch wirtschaftliche Aspekte der Wassernutzung bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zu betrachten.

### 6.3.1 EG-WRRL-Überwachungsmessnetze

Zur Überwachung des mengenmäßigen Zustandes wurden Messstellen des Landesgrundwasserdienstes mit einem für den jeweiligen Grundwasserkörper typischen Ganglinienverlauf ausgewählt. Mit Hilfe der Ganglinien und linearer Regression der Messwerte kann das Trendverhalten der Grundwasserstände bestimmt werden.

Zur Überwachung des chemischen Zustandes wurden repräsentative Messstellen ausgewählt, deren Grundwässer in ihrer Beschaffenheit typisch für die jeweiligen Grundwasserkörper sind. Die Grundwasserbeschaffenheit bzw. deren negative anthropogene Beeinflussung wird im Wesentlichen durch die flächige Landnutzung bestimmt. Deshalb wurde die Landnutzung im Einzugsgebiet einer Messstelle als Kriterium zur Auswahl der Messstellen herangezogen. Die Messstellendichte richtet sich nach den lokalen Gegebenheiten. In Gebieten mit einer höheren diffusen Belastung des Grundwassers wurden mehr

Messstellen ausgewählt, so dass hier eine höhere Messstellendichte vorliegt.

Die qualitative Überwachung des Grundwassers hinsichtlich der Belastungen aus diffusen Quellen gliedert sich entsprechend den Vorgaben der EG-WRRL in ein „operatives Messnetz“ und ein „Überblicksmessnetz“. Das operative Messnetz konzentriert sich auf Belastungsgebiete. Die Ergebnisse werden zum Abgleich mit den Qualitätsnormen und zur Ermittlung von signifikanten Trends herangezogen. Die Überwachung muss nach der EG-WRRL einmal pro Jahr erfolgen. Das Überblicksmessnetz ist Bestandteil der operativen Überwachung. Der Messturnus ist in der Regel mehrjährig.

Ziel des EG-WRRL-Überwachungsmessnetzes ist es, den qualitativen und quantitativen Grundwasserzustand und eventuelle Trends im Grundwasserkörper festzustellen.

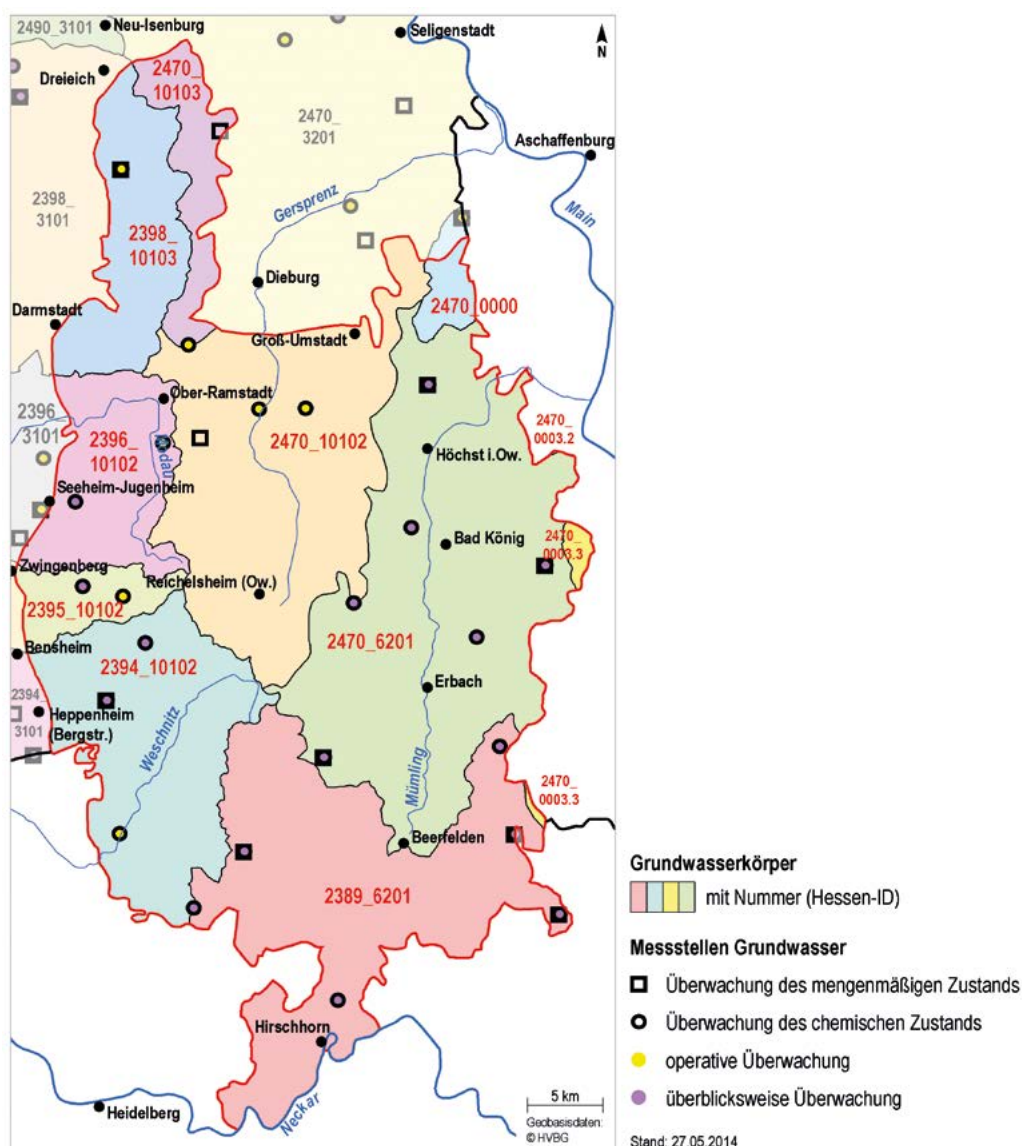


Abb. 6.3: Grundwasserkörper und EG-WRRL-Überwachungsmessnetz

## 6.3.2 Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper nach EG-WRRL

### 6.3.2.1 Monitoring

Ein guter mengenmäßiger Zustand des Grundwasserkörpers ist nach EG-WRRL (Anhang V, Abschn. 2.2.1) erreicht, wenn die langjährige mittlere Entnahme aus einem Grundwasserkörper die verfügbare Grundwasserressource nicht überschreitet.

Die Beurteilung des mengenmäßigen Zustandes der Grundwasserkörper erfolgte mittels einer Trend-

analyse der Grundwasserstände/Quellschüttungen und einer Wasserbilanzbetrachtung gemäß der Vorlage der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser „Analyse, Dargebot und Nutzung“ vom 16.09.2013) sowie dem Sachstandsbericht der LAWA („Fachliche Umsetzung der EG-WRRL, Teil 5, Bundesweit einheitliche Methode zur Beurteilung des mengenmäßigen Zustands“ vom 25.08.2011).

### 6.3.2.2 Zustand

Das Bearbeitungsgebiet wird durch 11 der 127 hessischen Grundwasserkörper (GWK) berührt. Zwei der 11 Grundwasserkörper liegen mit einem überwiegenden Flächenanteil im Bundesland Bayern. Ihre Bewertung erfolgt in Abstimmung mit dem bayerischen Landesamt für Umwelt.

In einem ersten Schritt zur Beurteilung des mengenmäßigen Zustands wurden im Rahmen der Grundwasserüberwachung die Grundwasserstandsganglinien von 23 Grundwassermessstellen in den GWK des Odenwaldes und Sprendlinger Horstes ausgewertet. Die Auswertung der Trendanalyse ergab, dass keine der 23 Messstellen signifikante Trendentwicklungen aufweist.

Nach EG-WRRL (Anhang V, Abschn. 2.1.1) wird als Parameter für die Einstufung des mengenmäßigen

Zustands des Grundwassers prinzipiell der Grundwasserspiegel genannt. Nach dem CIS-Leitfaden Nr. 18 (CIS 2009) gilt eine alleinige Bewertung auf Grundlage des Grundwasserstandes jedoch als unzureichend. Es wird empfohlen, generell weitere Parameter und Informationen zur Bewertung heranzuziehen.

Deshalb wurde eine Grundwasserbilanz für die vollständig in Hessen liegenden GWK erstellt. Die zur Bewertung – in Abhängigkeit vom Ergebnis bzw. der Zuverlässigkeit der Trendanalyse – herangezogene Wasserbilanzbetrachtung erfordert, dass die auf der Basis von langjährigen Datenreihen berechnete mittlere Grundwasserneubildung für den gesamten GWK den erteilten Wasserentnahmerechten sowie den tatsächlichen, und ebenfalls langjährigen, Entnahmen gegenübergestellt wird.

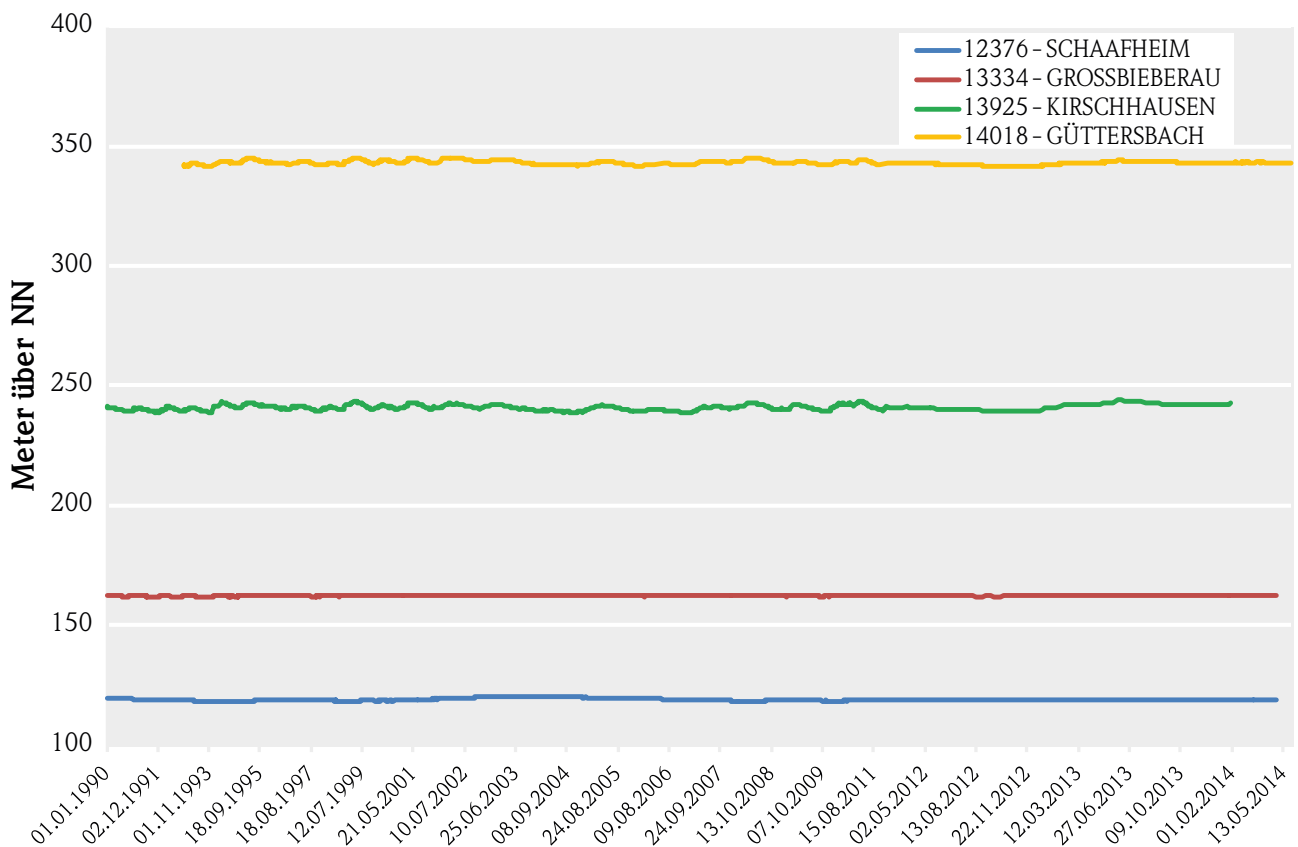


Abb. 6.4: Ganglinien der Grundwasserstände von beispielhaften Messstellen im Bearbeitungsgebiet Odenwald



Grundlage für die Berechnung der Grundwasserneubildung waren die mittleren korrigierten Niederschlagshöhen von 1971–2000 sowie die Beschreibung jedes einzelnen GWK durch Parameter wie Relief, Landnutzung, Gewässernetzdichte und verschiedene Bodendaten (HERGESELL & BERTHOLD 2004).

Grundlage der Bewertung ist der Anteil der erteilten Wasserentnahmerechte ab einer Menge von 3.600 m<sup>3</sup>/a an der Grundwasserneubildung, da die nach den erteilten Wasserentnahmerechten entnehmbaren Wassermengen regelmäßig höher sind als die tatsächlichen Entnahmen. Ihre Verwendung stellt damit den

ungünstigen Fall dar. Wenn die Summe der erteilten Entnahmerechte für Brunnen in einem GWK mehr als 30 % der Grundwasserneubildung beträgt, so ist eine weitergehende Bewertung vorgesehen.

In keinem der acht vollständig in Hessen liegenden GWK des Bearbeitungsgebietes betrug die wasserrechtlich gestattete Entnahmemenge mehr als 30 % der berechneten langjährigen Grundwasserneubildung. Die Grundwasserkörper, die federführend von Bayern bearbeitet werden, sind vom bayerischen Landesamt für Umwelt ebenfalls als in einem guten mengenmäßigen Zustand befindlich eingestuft worden (siehe auch [www.wasserblick.net](http://www.wasserblick.net)).

**Tab. 6.2:** Gegenüberstellung der Grundwasserneubildung/Grundwasserentnahme

GWK	Hydrogeologische Teilräume	Fläche GWK	Summe GWN	Summe genehmigte Entnahmen	Summe tatsächliche Entnahmen >3.600 m <sup>3</sup> /a	Anteil genehmigte Entnahmen	Anteil tatsächliche Entnahmen >3.600 m <sup>3</sup> /a
		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /a	m <sup>3</sup> /a	m <sup>3</sup> /a	%	%
2389_6201	Buntsandstein-Odenwald	304.065.940	62.730.142	3.830.027	2.262.514	6,1	3,6
2398_10103	Sprendlinger Horst	103.529.059	9.402.227	1.948.500	342.480	20,7	3,6
2470_10103	Sprendlinger Horst	54.186.252	4.815.579	7.000	264.840	0,1	5,5
2394_10102	Kristalliner Odenwald	198.371.083	37.209.819	5.575.186	2.477.383	15,0	6,7
2470_10102	Kristalliner Odenwald	287.013.600	44.474.114	7.053.840	3.260.199	15,9	7,3
2396_10102	Kristalliner Odenwald	103.267.118	16.694.677	2.107.980	1.294.595	12,6	7,8
2395_10102	Kristalliner Odenwald	38.521.003	5.882.299	809.150	501.436	13,8	8,5
2470_6201	Buntsandstein-Odenwald	608.697.133	100.032.386	14.485.172	13.365.329	14,5	13,4
2470_0000	Buntsandstein-Odenwald	21.467.875	2.554.677	143.600	73.382	5,6	2,9
2470_0003.3	Buntsandstein-Odenwald	7.420.533	*	*	*	*	*
2470_0003.2	Buntsandstein-Odenwald	27.123	*	*	*	*	*

\* Wird vom Landesamt für Umwelt in Bayern federführend bearbeitet

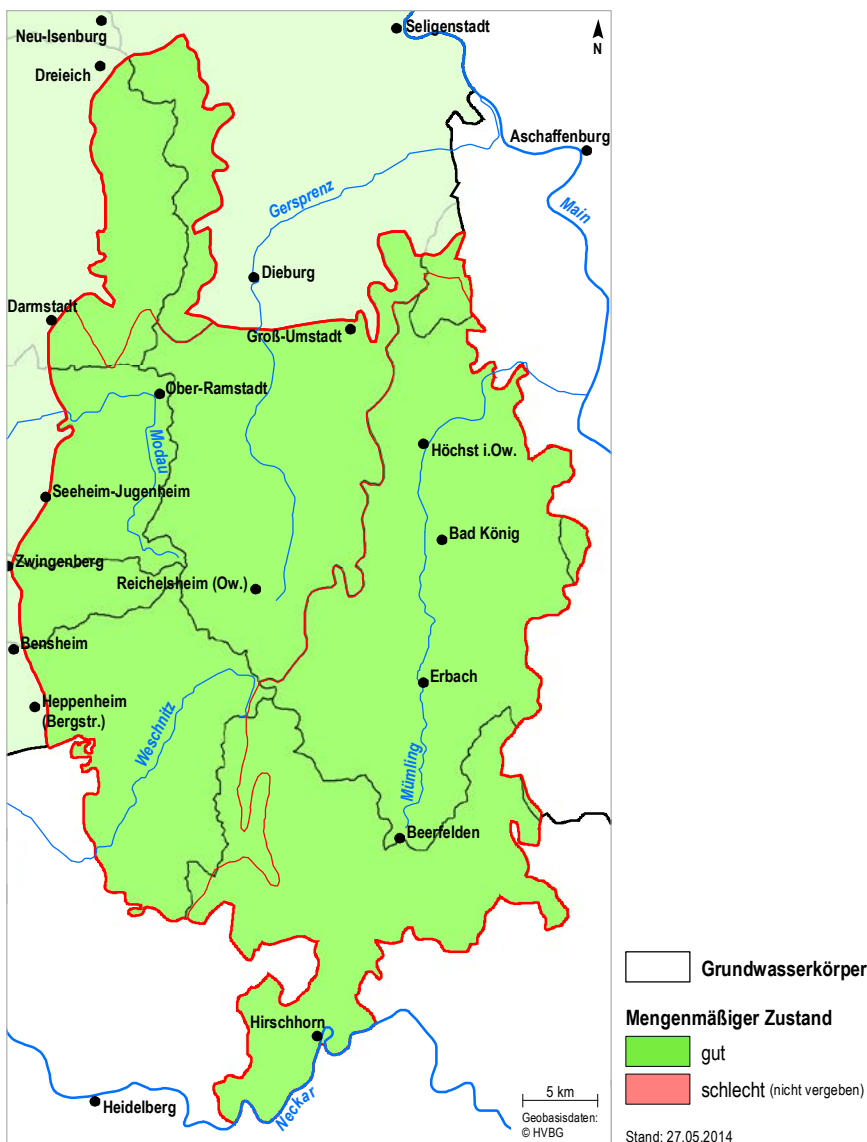


Abb. 6.5: Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper

### 6.3.2.3 Maßnahmen

Aufgrund der Einstufung der GWK als „in mengenmäßig gutem Zustand“ sind keine weiteren Maßnahmen notwendig.

## 6.3.3 Chemischer Zustand der Grundwasserkörper nach EG-WRRL

### 6.3.3.1 Monitoring

Zentraler und langfristiger Ansatz der EG-WRRL (2000) ist es, Wasser nur unter Beachtung von Nachhaltig-

keitsgrundsätzen zu nutzen, wodurch die Ressource Wasser langfristig geschützt wird. Für das Grund-

wasser gilt es, einen guten mengenmäßigen Zustand und einen guten chemischen Zustand einzuhalten oder zu erreichen. Die Anforderungen an den guten Zustand des Grundwassers wurden in der Grundwasserverordnung vom 09.11.2010 (GrwV 2010) spezifiziert. Die Grundwasserverordnung regelt in § 5 ff. die Beurteilung des chemischen Grundwasserzustandes mit Hilfe von Schwellenwerten. Demnach befindet sich ein Grundwasserkörper bei Überschreitung eines Schwellenwerts an einer Überwachungsmessstelle in einem schlechten chemischen Zustand, allerdings nur dann, wenn die Überschreitung anthropogen und nicht geogen bedingt ist.

Die Parameter mit den jeweiligen Schwellenwerten sind in Anlage 2 der GrwV aufgeführt. Kein Schwellenwert ist niedriger als der entsprechende Hintergrundwert im Grundwasserkörper (§ 5 Abs. 2 GrwV). Es gelten folgende Schwellenwerte:

lenwert ist niedriger als der entsprechende Hintergrundwert im Grundwasserkörper (§ 5 Abs. 2 GrwV). Es gelten folgende Schwellenwerte:

- Nitrat 50,0 mg/l
- Ammonium 0,5 mg/l
- Arsen 10,0 µg/l
- Cadmium 0,5 µg/l
- Blei 10,0 µg/l
- Quecksilber 0,2 µg/l
- Chlorid 250,0 mg/l
- Sulfat 240,0 mg/l
- Summe aus Tri- und Tetrachlorethen 10,0 µg/l
- Pflanzenschutzmittelwirkstoffe (PSM) 0,1 µg/l
- Summe der PSM-Einzelstoffe 0,5 µg/l

### 6.3.3.2 Nitrat, Ammonium und Pflanzenschutzmittelwirkstoffe (PSM)

Insbesondere Überschreitungen des Schwellenwertes für Nitrat führen in Hessen zur Einstufung von GWK als im „schlechten chemischen Zustand“ befindlich.

Von den 127 Grundwasserkörpern in Hessen berühren insgesamt 11 das Bearbeitungsgebiet. Zwei dieser 11 Grundwasserkörper sind aufgrund von Überschrei-

tungen des Schwellenwertes für Nitrat und einer davon zudem durch Überschreitung des Schwellenwertes für Pflanzenschutzmittelwirkstoffe in einem schlechten chemischen Zustand (Tabelle 6.3). Eine Kartendarstellung des chemischen Zustandes für die GWK in Hessen findet sich in der Abb. 6.6.

**Tab. 6.3:** Chemischer Zustand der Grundwasserkörper

GWK	Chemischer Zustand des Grundwasserkörpers bezüglich			
	Gesamt	NO <sub>3</sub>	PSM	NH <sub>4</sub>
2470_0000	schlecht	schlecht	schlecht	gut
2470_10102	schlecht	schlecht	gut	gut
2389_6201	gut	gut	gut	gut
2398_10103	gut	gut	gut	gut
2470_10103	gut	gut	gut	gut
2394_10102	gut	gut	gut	gut
2396_10102	gut	gut	gut	gut
2395_10102	gut	gut	gut	gut
2470_0003.3	gut	gut	gut	gut
2470_0003.2	gut	gut	gut	gut
2470_6201	gut	gut	gut	gut

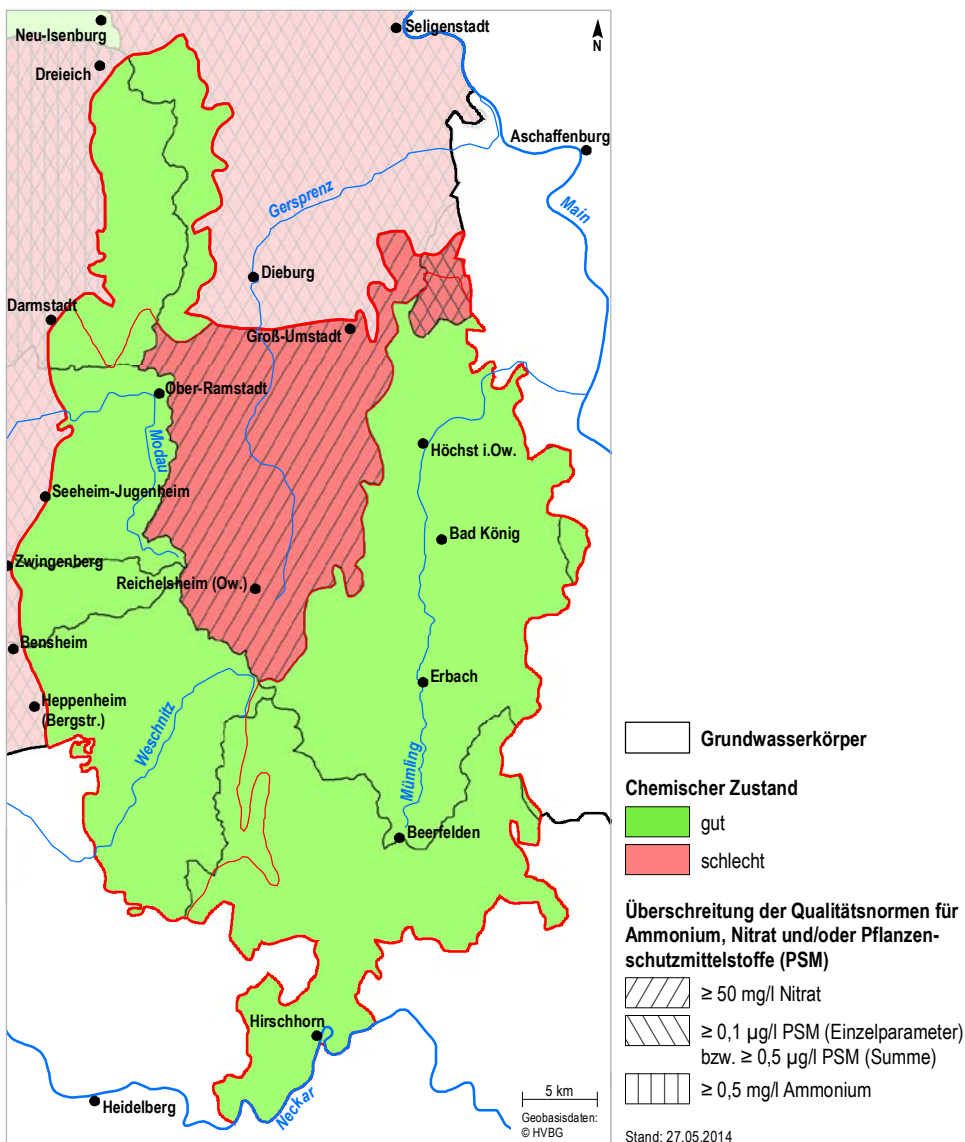


Abb. 6.6: Chemischer Zustand der Grundwasserkörper

### 6.3.3.3 Weitere Parameter nach Anlage 2 der Grundwasserverordnung

Die Mehrzahl aller hessischen Grundwasserkörper weist für alle weiteren Parameter der Anlage 2 der GrwV Stoffkonzentrationen auf, die deutlich unterhalb der ausgewiesenen Schwellenwerte liegen. Nur vereinzelt werden Schwellenwerte erreicht oder überschritten, wie im Folgenden dargestellt wird.

In den Buntsandsteinen des Odenwaldes und im Kristallin des Odenwaldes werden die Schwellenwerte für Arsen vereinzelt überschritten. Arsen steht in engem Zusammenhang mit der geogenen Verfügbar-

keit und dem Redox-Milieu des Grundwassers. In reduzierenden Bereichen zeigt Arsen eine erhöhte Löslichkeit. Die vereinzelt Überschreitungen sind geogener Herkunft, also natürlichen Ursprungs und führen damit nicht zu der Bewertung „schlechter chemischer Zustand“.

Der Abgleich mit den Schwellenwerten der weiteren Parameter an den Überwachungsmessstellen führt bei keinem der Grundwasserkörper zur Einstufung „schlechter chemischer Zustand“.

### 6.3.3.4 Maßnahmen und Maßnahmenräume mit Zielerreichung

Für die im Rahmen der EG-WRRL ergriffenen Maßnahmen wurden in Hessen sogenannte „WRRL-Maßnahmenräume“ definiert. Da die diffuse Belastung des Grundwassers mit Nitrat und auch Pflanzenschutzmittelwirkstoffen überwiegend aus Einträgen aus der Landwirtschaft resultiert, sind sogenannte ergänzende Maßnahmen erforderlich. Hierbei steht die

gewässerschutzorientierte landwirtschaftliche Intensivberatung in Verbindung mit beratungsbegleitenden Maßnahmen (z. B. Boden-N<sub>min</sub>-Untersuchungen) im Vordergrund. Ziel der Beratung ist es, die diffusen Stoffeinträge in den Boden und das Grundwasser zu minimieren.

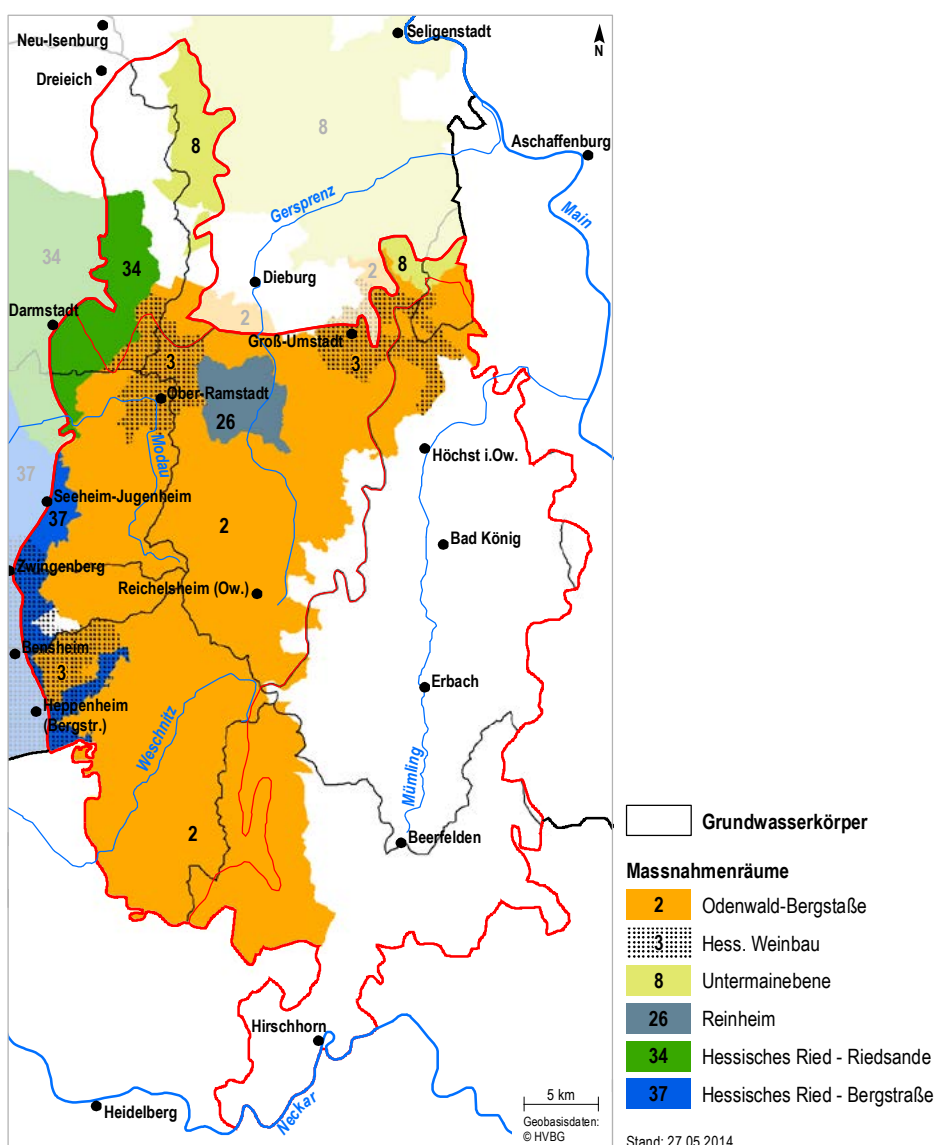


Abb. 6.7: Maßnahmenräume nach EG-WRRL (2000)

## 7 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme Hessens erarbeitet. Zielsetzung war eine umfassende hydrogeologische Systembeschreibung der hydrogeologischen Teilräume des Odenwaldes und des Sprendlinger Horstes.

Mit dem Bericht stehen vielfältige gebietsbezogene Fachinformationen zur Verfügung, die zur Bearbeitung hydrogeologischer und wasserwirtschaftlicher Fragestellungen genutzt werden können.

### Böden und Geologie

Das in Südhessen gelegene, rund 1.500 km<sup>2</sup> umfassende Bearbeitungsgebiet beinhaltet ein breites Spektrum unterschiedlicher Böden und geologischer Einheiten, die eine weite Spanne der Erdgeschichte vom Ordovizium bis zum Quartär abdecken. Die Böden unterscheiden sich aufgrund des Ausgangsgesteins und der Reliefgliederung. Bei den Bodentypen dominieren Braunerden und Pseudogleye in unterschied-

lichen Ausprägungen. Der geologische Untergrund besteht im westlichen Odenwald überwiegend aus kristallinem Grundgebirge (Ordovizium bis Karbon), das im nördlichen und östlichen Odenwald von sedimentärem Deckgebirge (insbes. Perm und Trias) überlagert wird. Diese Vielfalt spiegelt sich in regional abwechslungsreichen hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Standortgegebenheiten wider.

### Hydrogeologische Teilräume

Der Odenwald wird in die hydrogeologischen Teilräume Kristalliner Odenwald, Buntsandstein-Odenwald und Sprendlinger Horst gegliedert. Die metamorphen magmatischen Gesteine des Kristallinen Odenwaldes enthalten ein nur geringes nutzbares Hohlraumvolumen. Das Grundwasser bewegt sich vorwiegend in meist geringmächtigen oberflächennahen Poren-

grundwasserleitern der Verwitterungsschicht. Im Buntsandstein-Odenwald bilden die Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandsteins einen z. T. ergiebigen Kluftgrundwasserleiter. Die Rotliegend-Gesteine des Sprendlinger Horstes sind meist durch geringe hydraulische Durchlässigkeiten geprägt und führen verhältnismäßig wenig Grundwasser.

### Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung

Obwohl der Odenwald ein niederschlagsreiches Gebiet mit hoher Grundwasserneubildung ist, verfügt er über ein vergleichsweise geringes Grundwasserangebot. Die für das Bearbeitungsgebiet ermittelte Grundwasserneubildung weist eine sehr große Bandbreite auf. Während es im Sprendlinger Horst Standorte ohne nennenswerte Grundwasserneubildung gibt, reichen die Werte in den Hochlagen des Kristallinen- und des Buntsandstein-Odenwaldes bis über 12 l/(s · km<sup>2</sup>). Die mittlere Grundwasserneu-

bildung liegt im Buntsandstein-Odenwald mit 5,8 l/(s · km<sup>2</sup>) am höchsten, was sowohl auf die höchsten Niederschläge als auch das höhere nutzbare Wasserspeichervermögen gegenüber dem Kristallinen Odenwald (5,3 l/(s<sup>3</sup> · km<sup>2</sup>)) und dem Sprendlinger Horst (1,9 l/(s · km<sup>2</sup>)) zurückzuführen ist. Sowohl im Buntsandstein-Odenwald als auch im Kristallinen Odenwald liegt die Grundwasserneubildungshöhe deutlich über der mittleren Grundwasserneubildung Hessens (3,2 l/(s · km<sup>2</sup>)).

## Bohrungen, Grundwassererschließung und Wasserförderung

Das Bohrarchiv des HLNUG enthält für das Bearbeitungsgebiet mehr als 3.200 Bohrungen unterschiedlicher Tiefe, deren geologische und hydrogeologische Informationen für unterschiedliche Fragestellungen genutzt werden können.

Die Trinkwasserversorgung erfolgt im Odenwald und im Sprendlinger Horst aus Quelfassungen und Brun-

nen. Im Kristallinen Odenwald werden besonders häufig Quelfassungen zur dezentralen Wasserversorgung genutzt.

Im Rahmen des Landesgrundwasserdienstes wird ein flächenhaftes Messnetz unterhalten, das repräsentative Messwerte und Zeitreihen für Grundwasserstände und Quellschüttungen liefert.

## Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung

Die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung spiegelt deutlich die geologische Gliederung des Odenwaldes wider. Die Lockergesteinsbereiche der Talauen weisen meistens sehr geringe Schutzwirkungen auf, während insbesondere am westlichen Odenwaldrand mächtige Lößüberdeckungen über dem kristallinen Untergrund hohe Schutzwirkungen bedingen. Ohne quartäre Überdeckung haben die

Kristallingesteine eine geringe bis mittlere Schutzwirkung, der Buntsandstein wegen des oft hohen Grundwasserflurabstandes und der starken Reliefformung eine hohe oder mittlere Schutzwirkung. Die Rotliegend-Gesteine des Sprendlinger Horstes besitzen vorwiegend eine sehr geringe Schutzwirkung, was wegen ihrer geringen Nutzung für die Wasserversorgung allerdings nur lokal von Bedeutung ist.

## Grundwasserbeschaffenheit

Die Beschaffenheit der Grundwässer unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der grundwasserleitenden Gesteine und der Landnutzung. So tritt das Gebiet des Buntsandstein-Odenwaldes durch geringe Gesamtmineralisationen und Gesamthärten der Grundwässer in Erscheinung. Dies ist auf die vorwiegend aus Quarzmineralen bestehenden Sandsteine zurückzuführen, die nur wenig

zur Erhöhung der Grundwassermineralisation beitragen können. Eiszeitliche Einwehungen von Löß aus dem Rheintal haben flächenhaft zur Aufhärtung der Grundwässer in den östlichen und nördlichen Bereichen des Bearbeitungsgebietes geführt. Gebiete mit intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung zeigen häufig erhöhte Nitrat- und Sulfatkonzentrationen.

## Isotopenhydrologische Grundwasseruntersuchungen

Durch die Analyse stabiler Wasserisotope in natürlichen Wasserproben sind Rückschlüsse auf das Wasseralter, die Einzugsgebietshöhe und die jahreszeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung möglich. Für den Odenwald zeigt sich, dass die Grundwasserneubildung relativ gleichmäßig über das gesamte Jahr verteilt erfolgt. Weiterhin konnte eine Höhencharakterisierung der Einzugsgebiete vorgenommen werden, wonach der Zustrom von Grundwasser aus dem Kristallinen Odenwald in Richtung Oberrheingraben von Norden nach Süden hin abnimmt.

Die Tritium-Datierungen zeigen, dass im Kristallinen Odenwald die Grundwasseralter in Richtung Oberrheingraben zunehmen. Somit fließt das Grundwasser aus dem Kristallinen Odenwaldrandes sehr langsam in Richtung Hessisches Ried. Im Bereich des Weschnitztales wurde jüngerer Grundwasser im oberen Bereich des Grundwasserleiters gefunden, was auf eine flächige gute Wasserwegsamkeit in der Talauffüllung zurückzuführen ist. Eine Abschätzung des Zuflusses aus dem Kristallinen Odenwald in den Oberrheingraben ergab auf der gesamten Länge der betrachteten Kontaktfläche einen Zustrom von bis zu 16 Mio. m<sup>3</sup>/a.

## **Grundwassergewinnung/Wasserschutzgebiete**

Art und Lage der Trinkwassergewinnungsanlagen innerhalb des Bearbeitungsgebietes stehen in Zusammenhang mit den jeweiligen hydrogeologischen Standortgegebenheiten. So gibt es im wenig grundwasserhöffigen Kristallinen Odenwald viele geringe Grundwasserentnahmen, häufig aus Quelfassungen. Im Buntsandstein-Odenwald überwiegt die Grund-

wassergewinnung aus Brunnen mit meist höheren Entnahmemengen.

Der Schutz des zur öffentlichen Trinkwasserversorgung geförderten Grundwassers wird durch mehr als 70 Trinkwasserschutzgebiete gewährleistet.

## **Maßnahmenräume und Zustand nach EG-WRRL**

Nach den Bewertungskriterien der europäischen Wasserrahmenrichtlinie sind im Bearbeitungsgebiet zwei Grundwasserkörper aufgrund von Überschreitungen der Qualitätsnormen für Nitrat und Pflanzenschutzmittelwirkstoffe im schlechten chemischen Zustand.

Für diese Grundwasserkörper wurden Räume definiert, in denen Maßnahmen zur Herstellung des guten chemischen Zustandes umgesetzt werden. Nach den Bewertungskriterien des mengenmäßigen Zustandes sind alle Grundwasserkörper im guten Zustand.





## 8 Verwendete Literatur

- Arbeitskreis Grundwasserneubildung der FH-DGG (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. – Geol. Jb., **C 19**: 3–98, 30 Abb., 9 Tab.; Hannover.
- Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. – KLIWA-Ber., **17**: 112 S., 70 Abb., 15 Abb., 1 CD-ROM; Karlsruhe.
- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schr. Hydrol., **17**: X, 141 S., 35 Abb., 20 Tab., 3 Kt.; Freiburg i. Br.
- BACKHAUS, E. (1960): Zur Neugliederung des Odenwälder Buntsandsteins und ein Vergleich mit Nordhessen und Thüringen. – N. Jb. Geol. Paläont., Mh., **1960**: 292–313; Stuttgart.
- BACKHAUS, E. (1961): Das fossilführende Zechsteinvorkommen von Forstel - Hummetroth (Nordodenwald) und Bemerkungen zur südwestdeutschen Zechsteingliederung. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **89**: 187–202, 4 Abb.; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E. (1975): Der Buntsandstein im Odenwald. – Aufschluß, Sonderbd. **27** (Odenwald): 299–320; Heidelberg.
- BACKHAUS, E. (1981): Der marin-brackische Einfluß im Oberen Röt Süddeutschlands. – Z. dt. geol. Ges., **132**: 361–382, 5 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- BACKHAUS, E. (1987): Der Schollenbau des Odenwälder Deckgebirges. – Z. dt. geol. Ges., **138**: 157–171; Hannover.
- BACKHAUS, E. & FLÜGEL, E. (1971): Fazielle und geochemische Untersuchungen am Unteren Muschelkalk des Michelstädter Grabens (Odenwald). – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **99**: 200–213, 2 Abb., 5 Tab., Taf. 15; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E. & HEIM, D. (1995): Die fluvio-lakustrine Fazies des Übergangsbereichs Platten-sandstein/Rötquarzit (Oberer Buntsandstein) im mittleren Odenwald unter besonderer Berücksichtigung der Violetten Zone. – Geol. Jb. Hessen, **123/1995**: 49–68, 11 Abb., 1 Taf.; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E., BÄHR, R. & BINDIG, M. (2002): Faziesbild und stratigraphische Einstufung des Mittleren und Oberen Buntsandsteins am unteren Neckar (TK 25, Blatt 6620 Mosbach). – Geol. Jb. Hessen, **129**: 79–101; Wiesbaden.
- BACKHAUS, E. & SCHWARZ, S. (2003): Ein Sammelprofil des Buntsandsteins und Zechsteins im mittleren Odenwald anhand von Bohrungen und Gamma-Logs. – Geol. Jb. Hessen, **130/2002**: 91–107, 3 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- BALÁZS, Á. (1998): 14 Jahre Niederschlagsdeposition in Hessischen Waldgebieten. Ergebnisse von den Meßstationen der Waldökosystemstudie Hessen. – Forsch.-Ber. hess. forstl. Versuchs.-Anst., **25**: 129 S., 33 Abb., 16 Tab.; Hann. Münden.
- BAUER, A.W. (1993): Bodenerosion in den Waldgebieten des östlichen Taunus in historischer und heutiger Zeit – Ausmaß, Ursachen und geökologische Auswirkungen. – Frankfurter geowiss. Arb., **D 14**: 194 S., 45 Abb.; Frankfurt a. M.
- BECKSMANN, E. (1958): Verkarsteter Zechsteindolomit unter der Ziegelhäuser Neckarbrücke und die Ziegelhäuser Störungszone. – Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemb., **3**: 123–137, Abb. 8–10; Freiburg i.Br.
- BECKSMANN, E. (1970): Die zeitliche Aufgliederung der Bruchtektonik im Odenwald und Kraichgau. – Z. dt. geol. Ges., **121**: 119–123, 1 Abb.; Heidelberg.
- BECKSMANN, E. (1975): Tektonik des Deckgebirges im Odenwald. – Aufschluß, Sonderbd. **27** (Odenwald): 281–283; Heidelberg.

- BERK, W. V. & FU, Y. (2017): Redox Roll-Front Mobilization of Geogenic Uranium by Nitrate Input into Aquifers: Risks for Groundwater Resources. – *Environmental Science & Technology* **51**(1): 337–45.
- BINDIG, M. & BACKHAUS, E. (1995): Rekonstruktion der Paläoenvironments aus den fluviatilen Sedimentkörpern der Röt-Sandsteinfazies (Oberer Buntsandstein) Südwestdeutschlands. – *Geol. Jb. Hessen*, **123/1995**: 69–105, 31 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – 3. Lfg., Kartentafel 5.5: „Mittlere jährliche Grundwasserneubildung“; Berlin.
- BODIN, J., DELAY, F. & MARSILY, G. DE (2003): Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: 1. fundamental mechanisms. – *Hydrogeol. J.*, **11**: 418–433; Dordrecht.
- BUCHER, K. & STOBBER, I. (2000): The Composition of Groundwater in the Continental Crystalline Crust. – In: STOBBER, I. & BUCHER, K. (Eds.): *Hydrogeology in Crystalline Rocks*. – *Water Sci. Technol. Library*, **34**: 141–175, 8 Fig., 2 Tab.; Dordrecht.
- CHELIUS, C. (1893): Geologischer Aufnahmebericht über Blatt Neunkirchen i. O. – *Notizbl. Ver. Erdkde. geol. L.-Anst.*, (IV) **14**: 3–8, 1 Taf.; Darmstadt.
- CHELIUS, C. (1897): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Blatt 6219 Brensbach.– 54 S.; Darmstadt (A. Bergsträsser).
- CHELIUS, C. (1899): Geologische Übersichtskarte des Odenwaldes 1 : 250 000. — In: CHELIUS, C. (1905): *Geologischer Führer durch den Odenwald*. – 80 S., 9 Abb., 1 Kt.; Stuttgart (Hobbing & Büchle).
- CHELIUS, C. (1905): *Geologischer Führer durch den Odenwald*. – 80 S., 8 Fig., 1 Kt.; Stuttgart (Hobbing & Büchle).
- DEMUTH, S. (1989): The application of the West German IHP recommendations for the analysis of data from small research basins. –In: ROALD, L., NORDSETH, K. & HASSEL, K.A. (Eds.): *FRIENDS in Hydrology*. – IAHS Publ. **187**: 47–60; Wallingford, UK.
- DERSCH-HANSMANN, M. & HUG, N. (2004): Oberer und Mittlerer Buntsandstein im Untergrund des Dieburger Beckens. – *Geol. Jb. Hessen*, **131/2003**: 81–95, 5 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- DIEDERICH, G. (1966): Fazies, Paläogeographie und Genese des Unteren Buntsandstein norddeutscher Auffassung im südlichen Beckenbereich.– *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **94**: 132–157; Wiesbaden.
- DIEDERICH, G. & EHRENBERG, K.-H. (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Bl. 5721 Gelnhausen. – 256 S., 35 Abb., 14 Tab., 1 Taf., 1 Beibl.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- DIEDERICH, G., FINKENWIRTH, A., HÖLTING, B., KAUFMANN, E., RAMBOW, D., SCHARPFF, H.-J., STENGEL-RUTKOWSKI, W. & WIEGAND, K. (1991): *Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1 : 300 000*. – *Geol. Abh. Hessen*, **95**: 83 S., 3 Abb., 4 Tab., 5 Kt.; Wiesbaden.
- DIN 4049-3 (Okt. 1994): *Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*. – 80 S., 20 Abb., 2 Tab.; Berlin (Beuth).
- DGJ – Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Rheingebiet, Teil 1: Hoch- und Oberrhein 1996: 1.11.1995–31.12.1996 (1998). – 162 S., 1. Kt.; Karlsruhe (L.-Anst. für Umweltschutz Baden-Württ.).

- DÖRHÖFER, G., HANNAPPEL, S. & VOIGT, H.-J. (2001): Die Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland (HÜK 200). – *Z. angew. Geol.*, **47** (3/4): 153–159, 3 Abb.; Hannover.
- DVGW – Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (2006): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser. – DVGW-Regelwerk, Techn. Regeln, Arbeitsbl. **W 101**: 19 S., 2 Abb., 1 Tab.; Bonn.
- EG-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – *ABl. europ. Gemeinschaft.*, **L 327**: 72 S.; Brüssel. [[http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF); Stand: 15.07.2015].
- EMMERICH, K.-H. (1994): Podsole im Buntsandstein-Odenwald. – *Geol. Jb. Hessen*, **122**: 173–184, 2 Abb.; Wiesbaden.
- European Commission. Directorate-General for the Environment (2009): Guidance on groundwater status and trend assessment. – Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) – Guidance Document, **18**: 84 S., 26 Fig., 5 Tab.; Luxembourg. [[https://circabc.europa.eu/sd/a/ff303ad4-8783-43d3-989a-55b65ca03afc/Guidance\\_document\\_N%C2%B018.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/ff303ad4-8783-43d3-989a-55b65ca03afc/Guidance_document_N%C2%B018.pdf); Stand: 15.07.2015].
- FREUDENBERGER, W. & FRIEDLEIN, V. (2011): Die Forschungsbohrungen Windshausen 1 (2006) und Zeitlofs 1 (2008) – Ergebnisse und Bedeutung für die Gliederung des Buntsandsteins. – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.*, **93**: 27–44; Stuttgart.
- FREUDENBERGER, W., GEYER, G., & SCHRÖDER, B. (2013): Der Buntsandstein im nördlichen Bayern (nordwestliches Franken, Bruchschollenland und Randfazies im Untergrund). – In: Deutsche Stratigraphische Kommission, (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland XI – Buntsandstein*. – *Schr.-R. dt. Ges. Geowiss.*, **69**: 547–582; Stuttgart.
- FRIEDRICH, R. (2007): Grundwassercharakterisierung mit Umwelttracern: Erkundung des Grundwassers der Odenwald-Region sowie Implementierung eines neuen Edelgas-Massenspektrometersystems. – Diss. Univ. Heidelberg. [urn:nbn:de:bsz:16-opus-74697].
- FRITSCHKE, H.-G., HEMFLER, M., KÄMMERER, D., LEßMANN, B., MITTELBACH, G., PETERS, A., PÖSCHL, W., RUMOHR, S. & SCHLÖSSER-KLUGER, I. (2003): Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). – *Geol. Jb. Hessen*, **130/2002**: 5–19, 1 Abb.; Wiesbaden.
- Geologische Übersichtskarte Bundesrepublik Deutschland 1 : 200 000 (GÜK 200) (1973–2003). – 55 Bl.; Hannover (BGR).
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. – 5. Aufl.: X, 627 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GUO, C., STETZENBACH, K. J. & HODGE, V. F. (2005): Determination of 56 trace elements in three aquifer-type rocks by ICP-MS and approximation of the relative solubilities for these elements in a carbonate system by water-rock concentration ratios. – In: JOHANNESON, K. H. (Ed.): *Rare earth elements in groundwater flow systems*. – *Water Sci. Technol. Library*, **51**: 39–65, 5 Fig., 9 Tab.; Dordrecht.
- GRWV (2010): Grundwasserverordnung vom 9. November 2010. – *BGBl. I*: 1513; Berlin. [[http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/grwv\\_2010/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/grwv_2010/gesamt.pdf); Stand: 15.07.2015].
- HANNAPPEL, S., FRITSCHKE, H.-G. & LEßMANN, B. (2003): Die Erstellung der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK 200) in Hessen. – *Hess. Umwelt-Monitor* **7** (4): 3–8, 4 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- HASEMANN, W. (1928): Erläuterungen zu Blatt Eberbach. – *Geologische Spezialkarte von Baden*: 62 S., 3 Abb., 2 Taf.; Freiburg i. Br. [unveränd. Nachdr. als *Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 25 000*, Bl. 6519 Eberbach; Stuttgart 1984.].

- HERGESELL, M. & BERTHOLD, G. (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jber. hess. L.-Amt Umwelt Geol. **2004**: 47–66, 17 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- HERRMANN, F. (2010): Entwicklung einer Methodik zur großräumigen Modellierung von Grundwasserdruckflächen am Beispiel der Grundwasserleiter des Bundeslandes Hessen. – Diss. TU Cottbus: 144 S., 45 Abb., 11 Tab., Anh.; Cottbus.
- HESS, J.C. & SCHMIDT, G. (1989): Zur Altersstellung der Kataklastite im Bereich der Otzberg-Zone, Odenwald. – Geol. Jb. Hessen, **117**: 69–77, 3 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- HGK – Arbeitsgruppe „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum“ (1999): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum – Fortschreibung 1983-1998. – 155 S., 18 Kt., 1 CD-ROM; Stuttgart (Min. Umwelt Verkehr Baden-Württ.), Wiesbaden (Hess. Min. Umwelt, Landwirtsch. Forsten), Mainz (Min. Umwelt Forsten Rheinl.-Pfalz).
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2007): Geologische Übersichtskarte von Hessen 1 : 300 000. – 5. Aufl., digitale Ausg.; Wiesbaden. [<http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/geologie/guek300.pdf>].
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2013): Grundwasserbeschaffenheitsbericht 2012: 87 S., 55 Abb., 17 Tab.; Wiesbaden.
- HÖLTING, B., HAERTLÉ, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K. H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W. & WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb., **C 63**: 5-24, 5 Tab.; Hannover.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2013): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und angewandte Hydrogeologie. – 8. Aufl.: XXX-VII, 438 S., 137 Abb., 92 Tab.; Berlin (Springer Spektrum).
- HOSELMANN, C. & LEHNÉ, R. (2014): Die quartäre geologische Entwicklung und ein geologisches 3D-Modell des nördlichen Oberrheingrabens. – Geol. Jb. Hessen, **138**: 57–73, 11 Abb.; Wiesbaden.
- HUG, N. & VERO, G. (2008): Ein vollständiges Zechsteinprofil im südlichen Odenwald: die hydrogeologische Erkundungsbohrung Langenthal BK2/05. – Geol. Jb. Hessen, **135/2007**: 25–46, 6 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- Hydrogeologische Übersichtskarte Bundesrepublik Deutschland 1 : 200 000 (HÜK 200) (2000). – Digitale Ausg.; Hannover (BGR).
- JOHANNESON, K. H., CORTÉS, A., LEAL, J. A. R., RAMÍREZ, A. G. & DURAZO, J. (2005): Geochemistry of rare earth elements in groundwaters from a rhyolite aquifer, central México. – In: JOHANNESON, K. H. (Ed.): Rare earth elements in groundwater flow systems. – Water Sci. Technol. Library, **51**: 187–222; Dordrecht.
- KÄMMERER, D. (1998): Hydrogeologische Untersuchungen zur Grundwasserversauerung im südlichen Taunus. – Geol. Abh. Hessen, **103**: 125 S., 87 Abb., 27 Tab.; Wiesbaden.
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. u. Hydrogeochem.: 89–95; Hannover.
- KLAUSING, O. (1974): Die Naturräume Hessens – Mit einer Karte der naturräumlichen Gliederung im Maßstab 1 : 200 000. – 85 S.; Wiesbaden (Hess. L.-Anst. Umwelt).
- KLEMM, G. (1900): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Großherzogtums Hessen 1 : 25 000, Lfg. VI, Bl. [6419] Beerfelden. – 23 S.; Darmstadt (Bergsträßer).
- KLEMM, G. (1928): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blätter [6319] Erbach und [6320] Michelstadt. – 2. Aufl., faksimilierter Nachdr. (1994): 45 S., Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).

- KLEMM, G. (1929): Geologische Übersichtskarte des Odenwaldes 1 : 100 000. — 2. Aufl.; Darmstadt (Staatsverl. Hess. Geol. L.-Anst.).
- KÖTT, A., FRITSCH, J.-G., KRACHT, M., NESBOR, D. & REISCHMANN, T. (2013): Geologische Ergebnisse zur geothermischen Tiefbohrung Heubach/Odenwald. – Jahresber. hess. L.-Amt Umwelt Geol., **2012**: 111–115; Wiesbaden.
- KOWALCZYK, G. (1983): Das Rotliegende zwischen Taunus und Spessart. – Geol. Abh. Hessen, **84**: 99 S., 48 Abb., 2 Tab., 8 Taf.; Wiesbaden.
- KOWALCZYK, G. (2001): Permokarbon des Spremlinger Horstes und der westlichen Wetterau (Exkursion I am 20. April 2001). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., **83**: 211 – 236; Stuttgart.
- KOWALCZYK, G. (2012): Die Rotliegend-Vorkommen im nördlichen Oberrheingraben und am Taunus-Südrand. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.) : Stratigraphie von Deutschland X – Rotliegend, Teil I: Innervariscische Becken. – Schr.-R. dt. Ges. Geowiss., **61**: 345–350; Stuttgart.
- KROHE, A. (1991): Emplacement of synkinematic plutons in the Variscan Odenwald (Germany) controlled by transtensional tectonics. – Geol. Rdsch., **80** (2): 391–409, 12 Fig.; Stuttgart.
- KROHE, A. (1994): Verformungsgeschichte in der mittleren Kruste eines magmatischen Bogens – Der variszische Odenwald als Modellregion. – Geotectonic Res., **80**: 147, 54 Abb.; Stuttgart.
- KUPFAHL, H.-G., MEISL, S. & KÜMMERLE, E. (1972): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Bl. 6217 Zwingenberg a.d. Bergstraße. – 2. Aufl.: 276 S., 67 Abb., 48 Tab.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1998): Richtlinien für Heilquellenschutzgebiete. – 3. Aufl.: 27 S.; Berlin (Kulturbuchverl.).
- LANG, S. (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern). – Diss. TU Darmstadt: 97 S., Anh., CD-ROM; Darmstadt.
- LANG, S. & SEIDENSCHWANN, G. (2012): Die pliozäne Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke, des Kinziggebietes und des Vorspessarts. – Jber. wetterau. Ges. Naturkde., **162**: 79–132, **11** Abb., 3 Tab., 10 Fotos; Hanau.
- LUDWIG, F. (2011): Regional variation of chemical groundwater composition in Hessen, Germany, and its relation to the aquifer geology. – Diss. Univ. Freiburg i. Br.: 137 S., Anh.: 26 S., 37 Fig., 17 Tab.; Freiburg i. Br.
- LUDWIG, F. (2013): Geogene Hintergrundwerte der Hauptbestandteile und Spurenstoffe in hessischen Grundwässern. – Geol. Abh. Hessen, **118**: 165 S., 144 Abb., 29 Tab.; Wiesbaden.
- MAQSUD, N. (1984): Beobachtungen zur regional-räumlichen Verbreitung pleistozän-periglazialer Fazies im Bergsträßer Odenwald. – Mitt. Pollichia, **72**: 139–162, 12 Abb., 2 Tab.; Bad Dürkheim.
- MARELL, D. (1989): Das Rotliegende zwischen Odenwald und Taunus. – Geol. Abh. Hessen, **89**: 128 S., 57 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- MATTHESS, G. (1964): Zur Vergrusung der magmatischen Tiefengesteine des Odenwaldes. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **92**: 160–178, 1 Abb.; Wiesbaden.
- MCLEAN, J.E. & BLEDSOE, B.E. (1992): Behavior of metals in soils. – EPA Ground water issue: 25 S., 10 Fig., 4 Tab.; Washington, D.C. [<http://www.epa.gov/superfund/remedytech/tsp/download/issue14.pdf>; Stand: 15.07.2015].
- MENZEL, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evaporation mit TRAIN. – PIK Report, **54**: 30 S., 12 Abb., 2 Tab.; Potsdam. [<https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr54.pdf>; Stand: 15.07.2015].
- MOLDENHAUER, K.-M. (1993): Quantitative Untersuchungen zu aktuellen fluvial-morphodynamischen Prozessen in bewaldeten Kleinzugsgebieten von Odenwald und Taunus. – Frankfurter geowiss. Arb., **D 15**: 307 S., 108 Abb., 66 Tab.; Frankfurt a. M.

- MORHARD A. (2012): Kurzbeschreibung des Modells GWN-BW. Bedienung und Erweiterungen in Version 3.x. Stand 13.08.2012: 32 S.; Freiburg i. Br. (GIT HydroS Consult). [<http://www.hydrosconsult.com/hydrologie/modelldokugwn-bw/>; Stand: 15.07.2015].
- NAGY, M.-I. (1993): Stratigraphie und Tektonik des Buntsandsteins zwischen Ulfenbach- und Finkenbachtal unter Einsatz einer EDV-gestützten Luftbildauswertung. – unveröffentl. Dipl.-Arb. TU Darmstadt: 210 S.; Darmstadt.
- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). – Wasserwirtsch., Sonderh., **41**: 12-14; Stuttgart.
- NITSCH, E. & ZEDLER, H. (2009): Oberkarbon und Perm in Baden-Württemberg. – LGRB-Informationen, **22**: 7–102; Freiburg i. Br.
- NITSCH, E. (2013): Nachtrag zur stratigraphischen Nomenklatur des Buntsandstein in Baden-Württemberg, Stand 2011. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. – Schr.-R. dt. Ges. Geowiss., **69**: 532–546; Stuttgart.
- PAUL, J. (1985): Stratigraphie und Fazies des südwestdeutschen Zechsteins. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 59–73; Wiesbaden.
- PHILLIPS, I. R. (1999): Copper, Lead, Cadmium, and Zinc Sorption by Waterlogged and Air-Dry Soil. – J. Soil Contamin., **8** (3): 343–364, London.
- PIPER, A.M. (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. – Trans. AGU, **25**: 914–928, 4 Abb., 2 Tab.; Washington, D. C.
- RAWANPUR, A. (1975): Geologisch-tektonischer Bau des Michelstädter Grabens (Odenwald) und dessen Auswirkungen auf das Grundwasser. – Diss. TU Darmstadt: 147 S., 25 Abb., 16 Tab., 1 Kt.; Darmstadt.
- QUADFLIEG, A. (1990): Zur Geohydrochemie der Kluftgrundwasserleiter des nord- und osthessischen Buntsandsteingebietes und deren Beeinflussung durch saure Depositionen. – Geol. Abh. Hessen, **90**: 110 S., 26 Abb., 24 Tab., 8 Beil., Wiesbaden.
- Regierungspräsidium Darmstadt (Hrsg.) (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried. – 135 S. mit Anl. Teil A u. B/C; Darmstadt.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Ber. dt. Wetterdienst., **194**: 93 S.; Offenbach.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1974): Stratigraphische Synopsis des deutschen Buntsandsteins. – Geol. Jb., **A 25**:127–132, 1 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- ROZANSKI, K., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. & GONFIANTINI, R. (1993): Isotopic patterns in modern global precipitation. – In: SWART, P. K., LOHMANN, K. C., MCKENZIE, J. & SAVIN, S. (Eds.): Climate Change in Continental Isotopic Records. – AGU Geophysic. Monogr. Ser., **78**: 1–36; Washington, D.C.
- SCHÄLICHE, W. (1969): Geologische Untersuchungen zur Struktur der Otzberg-Zone im Odenwald. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **97**: 296–330, 8 Abb., 20 Diagr.; Wiesbaden.
- SCHMITT, O. (1964): Über pleistozäne Ablagerungen am Rand des Odenwaldes. – Z. dt. geol. Ges., **116**: 987–989; Stuttgart.
- SCHOELLER, H. (1962): Les eaux souterraines. – 642 S., 187 Abb.; Paris (Masson).
- STEIN, E. (2001a): Die magmatischen Gesteine des Bergsträßer Odenwaldes und ihre Platznahme-Geschichte. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., **83**: 267–283, 2 Abb.; Stuttgart.
- STEIN, E. (2001b): The geology of the Odenwald Crystalline Complex. – Mineralogy and Petrology, **72**: 7–28; Heidelberg (Springer).

- STEIN, E.; ALTENBERGER, U. & KREHER-HARTMANN, B. (2001): Geologie des Kristallinen Odenwaldes – seine magmatische und metamorphe Entwicklung (Exkursion D1 am 19. und D2 am 20. April 2001). – Jber. Mitt. ober-rhein. geol. Ver., N. F., **83**, 89–111, 6 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- STEINER, S. (2014): Mitteltiefe Erdwärmesonde Heubach: Thermische Modellierung der Untergrundverhältnisse im laufenden Betrieb. – Masterarbeit, Inst. Angew. Geowiss. TU Darmstadt, XV, 106 S., 76 Abb., 9 Tab., 1 CD-ROM; Darmstadt. [[http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/heubach/Steiner\\_2014\\_Masterarbeit\\_TEWS-Heubach.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/heubach/Steiner_2014_Masterarbeit_TEWS-Heubach.pdf); Stand: 19.09.2016].
- STOLZ, C. (2008): Historisches Grabenreißen im Wassereinzugsgebiet der Aar zwischen Wiesbaden und Limburg. – Geol. Abh. Hessen, **117**: 138 S., 53 Abb., 14 Tab.; Wiesbaden.
- VOß, H.-U. (1994): Fibel und Fibeltracht, II H: Römische Kaiserzeit und Völkerwanderungszeit zwischen Rhein und Elbe. – In: Reallexikon der Germanischen Altertumskunde, Bd. **8**: 497–508; Berlin (De Gruyter).
- WAGNER, B., TÖPFNER, C., LISCHIED, G., SCHOLZ, M., KLINGER, R. & KLAAS, P. (2003): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns.– GLA-Fachber., **21**: 250 S., 107 Abb., 15 Tab., München.
- WENDLAND, F., BERTHOLD, G., FRITSCHKE, J.-G., HERRMANN, F., KUNKEL, R., VOIGT, H.-J. & VERECKEN, H. (2011): Konzeptionelles hydrogeologisches Modell zur Analyse und Bewertung von Verweilzeiten in Hessen. – Grundwasser, Z. Fachsektion Hydrogeol. (Fachbeitr.) **16** (3): 163–176; Berlin.
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: GRAHAM, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. – Forsch. dt. Landeskd., **104**: 47–54; Remagen/Rh.



## 9 Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem	HMUELV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BFD	Bodenflächendaten Hessen	HMUKLV	Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BFI	Baseflow-Index	HÜK	Hydrogeologische Übersichtskarte
BÜK	Bodenübersichtskarte	KLIWA	Arbeitskreis Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch	MoMNO	Mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss
DVWG	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches	MQ	Mittlerer Abfluss
DWD	Deutscher Wetterdienst	MWL	Meteoric Water Line
EG-WRRL	Wasserrahmenrichtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates	N <sub>min</sub>	Verfügbare mineralisierter Stickstoff
ET	Tatsächliche Verdunstung	OD/ODW	Odenwald
GK	Geologische Karte	OZH	Oberer Zwischenhorizont
GMWL	Global Meteoric Water Line	Q	Abfluss
GOK	Geländeoberkante	REGNIE	Regionalisierung der Niederschlagshöhen Deutschlands
GÜK	Geologische Übersichtskarte	RPDA	Regierungspräsidium Darmstadt
GruWaH	Grundwasserdatenbank Hessen	TRAIN	Verdunstungsmodell
GrwV	Grundwasserverordnung	TU	Tritiumeinheit (tritium units) für Tritiumkonzentration
GWN	Grundwasserneubildung	UK	Unterkante
GWN-BW	Bodenwasserhaushaltsmodell		
HBV	Niederschlag-Abfluss-Modell Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning		
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Name bis 2015)		
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (neuer Name seit 2016)		

## Elemente/Verbindungen

Ar	Argon
Ca	Kalzium
Cl	Chlor/Chlorid
Fe	Eisen
He	Helium
K	Kalium
Kr	Krypton
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Na	Natrium
Ne	Neon
Si	Silizium
Xe	Xenon
HCO <sub>3</sub>	Hydrogencarbonat
NO <sub>3</sub>	Nitrat
SO <sub>4</sub>	Sulfat