

Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum

**Fortschreibung
1983 - 1998**

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg

Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten

Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz

**Stuttgart · Wiesbaden · Mainz
1999**

Impressum

Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum Fortschreibung 1983-1998 Stuttgart · Wiesbaden · Mainz · 1999

Herausgeber:	Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
Bearbeitung:	Arbeitsgruppe: „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum“
Kartenbearbeitung:	Gesellschaft für Geographische Datenverarbeitung, 55291 Saulheim, in Zusammenarbeit mit dem Graphik-Design-Büro realize, 65396 Walluf
Druck:	Wilhelm Stober GmbH, Eggenstein
Auflage:	600 Berichte für das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg 300 Berichte für das Hessische Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten 600 Berichte für das Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
Schutzgebühr:	150,- DM

Alle Rechte beim Herausgeber. Nachdruck oder Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

VORWORT

Im Rhein-Neckar-Raum haben günstige Standortbedingungen, vor allem auch die ergiebigen Grundwasservorräte im Oberrheingraben dazu beigetragen, dass sich dieses Gebiet zu einem der bedeutendsten Wohn- und Wirtschaftszentren im Südwesten Deutschlands entwickelt hat. Insbesondere die Zunahme der Bevölkerung, des Gewerbes und vor allem der Industrie nach dem 2. Weltkrieg führten zu einer stark ansteigenden Nutzung der Grundwasservorräte, so dass umfassende länderübergreifende Untersuchungen zur Grundwasserbewirtschaftung und -beschaffenheit erforderlich wurden.

Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Hessen hatten sich erstmals im Jahr 1973 darauf verständigt, durch eine länderübergreifende Arbeitsgruppe die Möglichkeiten und Grenzen der Grundwasserbewirtschaftung aufzuzeigen und gezielte Maßnahmen für eine umweltverträgliche Nutzung vorzuschlagen. Während zu Beginn der Untersuchungen die mengenmäßige Betrachtung des oberflächennahen Grundwassers im Vordergrund stand, haben sich bei den nachfolgenden Bearbeitungen die Schwerpunkte mehr auf die Bewirtschaftung der tieferen Grundwässer und auf Fragen der Grundwassergüte verlagert.

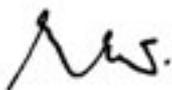
Die nun im 3. Bericht dargelegten Arbeitsergebnisse basieren in Ergänzung zum 1. Bericht „Analyse des Ist-Zustandes“ und zum 2. Bericht „Situation heute – Möglichkeiten und Grenzen künftiger Entwicklungen“ auf den neuesten hydrogeologischen und modelltechnischen Untersuchungsverfahren, wobei erstmals für die Aufbereitung und Auswertung aller Wasserhaushaltsdaten länderabgestimmte Datenbanken aufgebaut wurden und geographische Informationssysteme (GIS) zur Themenbearbeitung und Kartendarstellung Verwendung fanden. Die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Daten wurden für den Zeitraum 1983 bis 1998 fortgeschrieben und das vorhandene länderübergreifende Grundwassermodell wurde umfassend aktualisiert.

Der 3. Bericht der Hydrogeologischen Kartierung stellt in Verbindung mit dem aktualisierten großräumigen Grundwassermodell ein wichtiges Instrument zur Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum dar. Er bildet die Arbeitsgrundlage für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen, die den Grundwasserschutz und die Grundwassernutzung im Rhein-Neckar-Raum betreffen. Auf dieser Grundlage können weiterführende regionale Planungen aufbauen.

Weiterhin Anlass zur Besorgnis gibt die durch menschliche Einwirkungen negativ beeinflusste Beschaffenheit in den oberflächennahen und bereichsweise auch in den tieferen Grundwässern. Die bisher eingeleiteten Sanierungsmaßnahmen zeigen, wie zeitintensiv und kostenträchtig diese Reparaturmaßnahmen sind. Dementsprechend kommt dem vorsorgenden Schutz des Grundwassers und der oberirdischen Gewässer heute und in Zukunft eine prioritäre Bedeutung zu.

Die in den vergangenen 25 Jahren gewachsene vertrauensvolle und kooperative Zusammenarbeit in der länderübergreifenden Arbeitsgruppe war Garant für die im vorliegenden Bericht dargelegten Ergebnisse. Allen hieran Beteiligten sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Allerdings darf diese grenzübergreifende Zusammenarbeit mit dem jetzt vorgelegten Bericht nicht ihr Ende finden. Die gemeinsame Verantwortung für den Schutz der Grundwasservorräte im Rhein-Neckar-Raum erfordert auch in Zukunft eine enge Zusammenarbeit.

Ulrich Müller



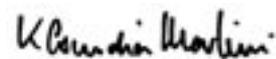
Minister für Umwelt
und Verkehr
Baden-Württemberg

Wilhelm Dietzel



Hessischer Minister für
Umwelt, Landwirtschaft
und Forsten

Klaudia Martini



Ministerin für Umwelt und
Forsten Rheinland-Pfalz

Mitglieder der Arbeitsgruppe:

Dr. Engesser, W.	Geologiedirektor	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
Gudera, Th.	Diplom-Bauingenieur	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
v. Pape, W.-P.	Geologieoberrat	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. Pöschl, W.	Geologiedirektor	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. Kärcher, Th.	Obergeologierat	Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz
Schwebler, W.	Diplom-Bauingenieur	Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz (Obmann der Arbeitsgruppe)

Zeitweilige Mitarbeiter und ehemalige Mitglieder der Arbeitsgruppe:

Regierungspräsidium Karlsruhe:	Baudirektorin Adler-Kuhn Oberbaurat Bergdolt Oberbaurat a.D. Kaufmann
Landratsamt Rhein-Neckar-Kreis:	Oberamtsrat Engelhart
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:	Diplom-Bauingenieur Wingering
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg:	Geologiedirektor Dr. Plum Landwirtschaftsrat Dr. Weinzierl
Regierungspräsidium Darmstadt:	Baudirektor Plohmann †
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie:	Landwirtschaftsrat Dr. Berthold Geologierat Dr. Mittelbach Geologiedirektor Prof. Dr. Sabel
Bezirksregierung Rheinhessen-Pfalz, Neustadt (heute: Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd):	Baudirektor a.D. Becker
Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz:	Dipl.-Bauingenieur (FH) Baumeister
Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz:	Geologiedirektor Dr. Agsten Obergeologierat Dr. Dreher Dipl.-Geograph Goldschmitt Geologiedirektor Dr. Wourtsakis

Grundwassermodell:

Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH, Koblenz:	Dr.-Ing. Schöpfer Dipl.-Ing. Probst
---	--

INHALT

	Seite
1 Einleitung	15
2 Bisherige Untersuchungen	17
2.1 Allgemeines	17
2.2 Hydrogeologie	17
2.3 Hydrologie	19
2.4 Grundwasserbeschaffenheit	21
2.5 Mathematisches Grundwassermodell und -bilanz	22
3 Geologie, Hydrogeologie	25
3.1 Allgemeines	25
3.2 Datenaufbereitung, -auswertung und -archivierung	25
3.3 Neue hydrogeologische Kenntnisse	27
3.3.1 Hydrogeologischer Untergrundaufbau	27
3.3.2 Hydraulische Eigenschaften	32
4 Hydrologie	35
4.1 Messnetze	35
4.2 Grundwasserstand	37
4.2.1 Allgemeines	37
4.2.2 Zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände im Oberen Grundwasserleiter	38
4.2.3 Zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände in den tieferen Grundwasserleitern	51
4.2.4 Grundwasseroberfläche und Druckverteilung	61
4.2.4.1 Allgemeines	61
4.2.4.2 Oberes Grundwasser	62
4.2.4.3 Flurabstände des Oberen Grundwassers	63
4.2.4.4 Mittleres Grundwasser	63
4.3 Komponenten der Grundwasserbilanz	64
4.3.1 Allgemeines	64
4.3.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag	65
4.3.2.1 Berechnungsverfahren	65
4.3.2.2 Datengrundlage	66

	Seite
4.3.2.3 Niederschlag	67
4.3.2.4 Potentielle Evapotranspiration nach HAUDE	68
4.3.2.5 Bodennutzung	69
4.3.2.6 Pflanzenverfügbares Bodenwasser ($W_{Pfl.}$)	69
4.3.2.7 Berechnung der Sickerwasserhöhe	71
4.3.2.8 Grundwasserneubildung aus Niederschlag	71
4.3.3 Wechselwirkung mit oberirdischen Gewässern	72
4.3.4 Unterirdische Randzuströme	73
4.3.5 Speicherfüllung und -entleerung	74
4.3.6 Grundwasserentnahmen und -anreicherungen	74
5 Grundwasserbeschaffenheit	83
5.1 Allgemeines	83
5.2 Datengrundlage und Auswertemethodik	83
5.3 Beschaffenheit der Niederschläge und der oberirdischen Gewässer	85
5.4 Allgemeine chemische Charakteristik des Grundwassers	88
5.4.1 Elektrische Leitfähigkeit	93
5.4.2 Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat und pH-Wert	93
5.4.3 Sulfat	94
5.4.4 Redox-Verhältnisse, Eisen und Mangan	94
5.4.5 Natrium, Kalium und Chlorid	95
5.4.6 Nitrat, Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel	95
5.4.7 Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	97
5.4.8 Anorganische Spurenstoffe	97
5.4.9 Kohlenstoff-14 und Tritium	99
5.5 Zeitliche hydrochemische Entwicklungen	100
5.5.1 Oberes Grundwasser	100
5.5.2 Mittleres Grundwasser	103
5.5.3 Unteres Grundwasser	103
5.6 Bewertung der hydrochemischen Untersuchungen	106
5.6.1 Situation im Oberen Grundwasserleiter	106
5.6.2 Situation im Mittleren Grundwasserleiter	106
5.6.3 Situation im Unteren Grundwasserleiter	107
5.6.4 Kenntnislücken	107
6 Grundwasserüberdeckung	109
6.1 Bodenkarte	109
6.2 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung	109

	Seite
7	Mathematisches Grundwassermodell 113
7.1	Allgemeines 113
7.2	Fortschreibung des großräumigen Grundwassermodells 113
7.2.1	Einführung 113
7.2.2	Modellaufbau 114
7.2.2.1	Geometrien und Systemparameter 114
7.2.2.2	Randbedingungen 119
7.2.3	Stationäre Eichung 120
7.2.3.1	Vorgehensweise 120
7.2.3.2	Grundwasserbilanz 121
7.2.4	Instationäre Langzeiteichung 1983 bis 1993 125
7.2.4.1	Vorgehensweise 125
7.2.4.2	Analyse der Grundwasserstände in maßgebenden Teilgebieten 126
7.2.4.3	Grundwasserbilanz 131
7.2.5	Prognoseberechnung für das Jahr 2010 139
7.2.5.1	Modellüberprüfung 1996 (VER 1996) 139
7.2.5.2	Prognosevariante 2010 140
7.2.6	Bewertung und Ausblick 144
8	Zusammenfassung und Folgerungen 147
9	Literatur 155

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

	Seite
Abb. 2.1:	Geologisch-tektonische Übersicht des Rhein-Neckar-Raums 18
Abb. 3.1:	Schematischer W-E-Schnitt durch den Oberrheingraben im Rhein-Neckar-Raum 28
Abb. 3.2:	Durchlässigkeiten des oberen Teils des Oberen Grundwasserleiters (OGWL-oben) 33
Abb. 4.1:	Niederschlagssummen der Niederschlagsmessstelle Hochdorf 39
Abb. 4.2:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1091 Fußgönheim 39
Abb. 4.3:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1211 Haßloch 40
Abb. 4.4:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1445 Ellerstadt 41
Abb. 4.5:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1068 Dannstadt-Schauernheim 41
Abb. 4.6:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1061 Speyer 42
Abb. 4.7:	Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1103 A Frankenthal 43
Abb. 4.8:	Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Messstellen Nr. 1103 A und 1061 44
Abb. 4.9:	Rheinwasserstandsganglinie am Pegel Mannheim 45

	Seite
Abb. 4.10: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1073 Altrip	45
Abb. 4.11: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 100/256 Altlußheim	45
Abb. 4.12: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 103/256 Hockenheim	46
Abb. 4.13: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 118/254 Mannheim-Scharhof	46
Abb. 4.14: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 106/254 Gartenstadt	46
Abb. 4.15: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 109/306 St. Ilgen	47
Abb. 4.16: Niederschlagsganglinie (Monatssummen) und Sickerwasserganglinie (Monatssummen) der Messstellen Nr. 403/306 und 503/306 Sandhausen	48
Abb. 4.17: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 113/304 Heddesheim	48
Abb. 4.18: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544003 Hofheim	49
Abb. 4.19: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544026 Bürstadt	50
Abb. 4.20: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544023 Heppenheim	50
Abb. 4.21: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1404 I, II Ludwigshafen-Edigheim	52
Abb. 4.22: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1381 I, II Ludwigshafen-Oppau	53
Abb. 4.23: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1419 I, II Frankenthal	53
Abb. 4.24: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Messstellen Nr. 1399 und 1362 Bobenheim-Roxheim	54
Abb. 4.25: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1435 I, II Erpolzheim	55
Abb. 4.26: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1353 I, II Speyer	55
Abb. 4.27: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544261 flach und 544259 tief Nordheim	56
Abb. 4.28: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544049 flach und -234 tief Lampertheim	57
Abb. 4.29: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544012 flach und -256 tief Heppenheim	58
Abb. 4.30: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 103/256 flach und 703/256 tief Hockenheim	58
Abb. 4.31: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 128/254 flach und 728/254 tief Neckarstadt-Herzogenriedpark	59
Abb. 4.32: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 147/305 flach und 747/305 tief Heidelberg-Grenzhof	60
Abb. 4.33: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 133/304 flach und 733/304 tief Heddesheim	61
Abb. 4.34: Schematische Darstellung der Berechnungsschritte für die Ermittlung der Sickerwasserhöhe	70
Abb. 4.35: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Rheinland-Pfalz	76
Abb. 4.36: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Baden-Württemberg	79
Abb. 4.37: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Hessen	81

	Seite
Abb. 5.1: Verteilung der 527 vollständigen Grundwasseranalysen aus Messstellen und Brunnen	84
Abb. 5.2: Zeitreihen ausgewählter Inhaltstoffe in Rhein und Neckar im Jahr 1994. Messwerte aus DEUTSCHE KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DES RHEINS (1996)	87
Abb. 5.3: Box-Plots der wichtigsten Geländeparameter und Spurenstoffe, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter	90
Abb. 5.4: Box-Plots der wichtigsten Kationen und Anionen, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter	91
Abb. 5.5: Piper-Diagramme der Grundwasseranalysen, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter	92
Abb. 5.6: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 544258 im OGWL bei Heppenheim für den Zeitraum 1989 bis 1995; monatliche Messungen	101
Abb. 5.7: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1328 I im OGWL südöstlich von Dannstadt-Schauernheim für den Zeitraum 1980 bis 1997; mehrjährige Messungen	101
Abb. 5.8: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1335 im OGWL nördlich von Frankenthal für den Zeitraum 1980 bis 1997; mehrjährige Messungen	102
Abb. 5.9: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe des Brunnens 8 im OGWL der Wassergewinnungsanlage Rauschen westlich von Heidelberg für den Zeitraum 1966 bis 1994	102
Abb. 5.10: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 544220 im MGWL bei Lorsch für den Zeitraum 1985 bis 1995; monatliche Messungen im Zeitraum März 1989 bis April 1991	104
Abb. 5.11: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe im Wasserwerksbrunnen M2 der Wassergewinnungsanlage Schwetzinger Hardt im MGWL bei Schwetzingen für den Zeitraum 1972 bis 1994	104
Abb. 5.12: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe im Brunnen T1 des Wasserwerks Käfertal im MGWL für den Zeitraum 1968 bis 1998	105
Abb. 5.13: Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1328 II Dannstadt im UGWL südwestlich Ludwigshafen für den Zeitraum 1980 bis 1997; das Modellalter des Grundwassers beträgt über 12.600 Jahre	105
Abb. 7.1: Vertikale Gliederung des Modells im West-Ost-Schnitt	115
Abb. 7.2: Vertikale Gliederung des Modells im Nord-Süd-Schnitt	115
Abb. 7.3: Schnittspuren zu Abb. 7.1 und 7.2 durch das Modellgebiet	116
Abb. 7.4: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 1	127
Abb. 7.5: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 2	127
Abb. 7.6: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 3	127
Abb. 7.7: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 4	128
Abb. 7.8: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 5	128

	Seite
Abb. 7.9: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 6	128
Abb. 7.10: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 7	129
Abb. 7.11: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 8	129
Abb. 7.12: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 9	129
Abb. 7.13: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 10	130
Abb. 7.14: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 11	130
Abb. 7.15: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 12	130
Abb. 7.16: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 13	131
Abb. 7.17: Niederschlagssummen 1960 bis 1997 an der Station Frankenthal/Pfalz	139
Abb. 7.18: Gegenüberstellung der Grundwasserentnahmen – Ausgangszustand 1996 und Prognosevariante 2010 – nach Ländern und Branchen	140

VERZEICHNIS DER TABELLEN

	Seite
Tab. 3.1: Lithostratigraphische und hydrogeologische Gliederung der Lockergesteine im Rhein-Neckar-Raum und zum Vergleich die lithostratigraphische Gliederung in der HGK 1987	27
Tab. 3.2: Lithostratigraphische Gliederung der Lockergesteine im Rhein-Neckar-Raum und im südlich angrenzenden Raum Karlsruhe-Speyer, schematisch	28
Tab. 3.3: Mittlere k_f -Werte der linksrheinischen Grundwasserleiter	34
Tab. 4.1: Anzahl der Grundwassermessstellen (Stand 01.01.1998)	37
Tab. 4.2: Messstationen und Höhe des Niederschlags [mm] im Untersuchungsgebiet - Beobachtungszeitraum 1961 bis 1993	67
Tab. 4.3: Potentielle Verdunstung nach HAUDE im Zeitraum von 1961 bis 1993	68
Tab. 4.4: Berechnete Versickerungen im Untersuchungsraum	71
Tab. 4.5: Grundwasserentnahmen [Mio. m ³ /a] in Teilgebiet Rheinland-Pfalz	75
Tab. 4.6: Grundwasserentnahmen [Mio. m ³ /a] in Baden-Württemberg	78
Tab. 4.7: Grundwasserentnahmen [Mio. m ³ /a] im Teilgebiet Hessen	81
Tab. 5.1: Anzahl und Verteilung der ausgewerteten Grundwasserproben in den Grundwasserstockwerken und Übersicht der analysierten Parameter	84
Tab. 5.2: Mittelwerte täglicher Niederschlagsanalysen aus vier Messstationen (Zeitraum 1984 bis 1995). Niederschlagshöhen zwischen 584 mm/a und 1727 mm/a (UMWELTBUNDESAMT 1997); Daraus resultieren die	

	Seite
	möglichen Maximal-Konzentrationen im Sickerwasser für eine mittlere Grundwasserneubildung im Untersuchungsraum von 106 mm/a
Tab. 5.3:	85
	Mediane Beschaffenheit des Rheins (Station Karlsruhe) und des Neckars (Station Mannheim) im Jahr 1994; Messwerte aus DEUTSCHE KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DES RHEINS (1996); zum Vergleich: mediane Beschaffenheit des Grundwassers im OGWL; alle Angaben in mg/l
Tab. 5.4:	86
	Statistische Maßzahlen der ausgewerteten Grundwasseranalysen im Rhein-Neckar-Raum. Der Median entspricht dem 50%-Perzentilwert. Soweit nicht gesondert vermerkt, alle Zahlenangaben in mg/l
Tab. 5.5:	89
	Überprüfung der Zugehörigkeit der Grundwässer in den Messstellen zu den verschiedenen Grundwasserleitern mittels Diskriminanzanalyse: beobachtete Zuordnung aufgrund der Lage der Filterstrecken und statistisch berechnete Einstufung (Gruppierung) mittels der Hauptinhaltsstoffe und Geländeparameter. Insgesamt errechnet sich eine korrekte statistische Zuordnung von 78,4%
Tab. 5.6:	90
	Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel (PBSM) im OGWL
Tab. 5.7:	96
	Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
Tab. 5.8:	97
	Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf anorganische Spurenstoffe
Tab. 7.1:	98
	Bilanzkomponenten für mittlere Grundwasserverhältnisse im aktuellen (SBV 90) und im bisherigen (SBV 70/83) großräumigen Modell [Mio. m ³ /a]
Tab. 7.2:	121
	Bilanzkomponenten aus der instationären Langzeiteichung 1983 - 1993 des großräumigen Grundwassermodells [Mio. m ³]
Tab. 7.3:	131
	Bilanzkomponenten der stationären Bezugsvariante 1990 (SBV 90) und der Verifikation 1996 (VER 96) [Mio. m ³]
Tab. 7.4:	140
	Grundwasserhaltungs/-sanierungsentnahmen im Ausgangszustand 1996 (AUS 96) [Mio. m ³]
Tab. 7.5:	142
	Bilanzkomponenten des Ausgangszustands 1996 (AUS 96) und des Prognosezustands 2010 [Mio. m ³]
	143

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

Karte 1	Basis des Oberen Grundwasserleiters (OGWL) und Mächtigkeit des Oberen Zwischenhorizontes (OZH)	M 1: 50.000
Karte 2	Basis, Verbreitung und fazielle Ausbildung des Oberen Zwischenhorizontes (OZH)	M 1: 50.000
Karte 3	Verbreitung und Oberfläche der Zwischenhorizonte:	
3 a	Verbreitung und Oberfläche des Zwischenhorizontes ZH 1	M 1:100.000

3 b	Verbreitung und Oberfläche des Zwischenhorizontes ZH 2	M	1:100.000
3 c	Verbreitung und Oberfläche des Zwischenhorizontes ZH 3	M	1:100.000
3 d	Verbreitung und Oberfläche des Unteren Zwischenhorizontes UZH (Basis des Mittleren Grundwasserleiters MGWL)	M	1:100.000
Karte 4	Hydrogeologische Querschnitte	L = M	1: 50.000
	- Q 1 bis Q 3 -	H = M	1: 2.000
Karte 5	Hydrogeologische Quer- und Längsschnitte	L = M	1: 50.000
	- Q 4 und L 1, L 2 -	H = M	1: 2.000
Karte 6	Hydrogeologische Längsschnitte	L = M	1: 50.000
	- L 3, L 4 -	H = M	1: 2.000
Karte 7	Höhengleichen des Oberen Grundwassers am 1. Oktober 1990 und hydrologisches Messnetz	M	1: 50.000
Karte 8	Flurabstände des Oberen Grundwassers am 1. Oktober 1990 und hydrologisches Messnetz	M	1: 50.000
Karte 9	Höhengleichen des Mittleren Grundwassers und Differenz der Wasserstände zwischen dem Mittleren und Oberen Grundwasser am 1. Oktober 1990	M	1: 50.000
Karte 10	Hydrologische Karten:		
10 a	Höhengleichen des Oberen Grundwassers am 4. Oktober 1993	M	1:100.000
10 b	Flurabstände des Oberen Grundwassers am 4. Oktober 1993	M	1:100.000
10 c	Differenz der Wasserstände des Oberen Grundwassers zwischen 1. Oktober 1990 und 4. Oktober 1993	M	1:100.000
10 d	Höhengleichen des Mittleren Grundwassers und Differenz der Wasserstände zwischen dem Mittleren und Oberen Grundwasser am 4. Oktober 1993	M	1:100.000
Karte 11	Grundwasserneubildung aus Niederschlag und Isohyeten, Mittelwert der Jahre 1961 bis 1993	M	1: 50.000
Karte 12	Beschaffenheit des Oberen Grundwassers:		
12 a	Elektr. Leitfähigkeit	M	1:100.000
12 b	Sulfat	M	1:100.000
12 c	Chlorid	M	1:100.000
12 d	Nitrat	M	1:100.000
Karte 13	Beschaffenheit des Mittleren Grundwassers:		
13 a	Elektr. Leitfähigkeit	M	1:100.000
13 b	Sulfat	M	1:100.000
13 c	Chlorid	M	1:100.000
13 d	Kohlenstoff -14 und Tritium im tieferen Grundwasser	M	1:100.000
Karte 14	Bodenkarte	M	1: 50.000
Karte 15	Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung	M	1: 50.000
Karte 16	Geometrien und Systemparameter des großräumigen Grundwassermodells		
	Bilder 1-18:		
	Bild 1 Wassererfüllte Mächtigkeit des OGWL	M	1:250.000
	Bild 2 Mächtigkeit und Verbreitung des OZH	M	1:250.000
	Bild 3 Mächtigkeit des MGWL oben	M	1:250.000
	Bild 4 Mächtigkeit des MGWL mitte	M	1:250.000
	Bild 5 Mächtigkeit des MGWL unten	M	1:250.000
	Bild 6 Mächtigkeit und Verbreitung des ZH 2	M	1:250.000
	Bild 7 Mächtigkeit und Verbreitung des ZH 3	M	1:250.000

	Bild 8 Mächtigkeit und Verbreitung des UZH	M 1:250.000
	Bild 9 Mächtigkeit des UGWL	M 1:250.000
	Bild 10 Transmissivitäts-Verteilung im OGWL	M 1:250.000
	Bild 11 Transmissivitäts-Verteilung im MGWL oben	M 1:250.000
	Bild 12 Transmissivitäts-Verteilung im MGWL mitte	M 1:250.000
	Bild 13 Transmissivitäts-Verteilung im MGWL unten	M 1:250.000
	Bild 14 Transmissivitäts-Verteilung im UGWL	M 1:250.000
	Bild 15 Verteilung der Leakage-Koeffizienten für den OZH	M 1:250.000
	Bild 16 Verteilung der Leakage-Koeffizienten für den ZH 2	M 1:250.000
	Bild 17 Verteilung der Leakage-Koeffizienten für den ZH 3	M 1:250.000
	Bild 18 Verteilung der Leakage-Koeffizienten für den UZH	M 1:250.000
Karte 17	Darstellung der Grundwassermodellergebnisse Stationäre Bezugsvariante 1990 (SBV 90):	
17a	Modellnetz mit Abgrenzung der Teilgebiete sowie Grundwasserbilanzkomponenten in den Teilgebieten für die SBV 90	M 1:100.000
17b	Berechnete Grundwasserhöhengleichen im Oberen Grundwasserleiter der SBV 90 und Abweichungen zu den gemessenen Grundwasserständen am 1. 10.1990	M 1:100.000
17c	Berechnete Grundwasserhöhengleichen im Mittleren Grundwasserleiter der SBV 90 und Abweichungen zu den gemessenen Grundwasserständen am 1.10.1990	M 1:100.000
17d	Grundwasseraustauschmengen zwischen dem Oberen und dem Mittleren Grundwasserleiter der SBV 90	M 1:100.000
Karte 18	Darstellung der Grundwassermodellergebnisse Prognosevariante 2010:	
18a	Veränderung der Grundwasser Oberfläche im Oberen Grundwasserleiter – Vergleich Prognosevariante 2010 zu Ausgangszustand 1996 und berechnete Grundwasser Oberfläche der Prognosevariante 2010	M 1:100.000
18b	Veränderung der Grundwasser Oberfläche im Mittleren Grundwasserleiter – Vergleich Prognosevariante 2010 zu Ausgangszustand 1996 und berechnete Grundwasserdruckfläche der Prognosevariante 2010	M 1:100.000
18c	Berechnete Grundwasserhöhengleichen im Oberen Grundwasserleiter der Modellverifikation 1996 und Abweichungen zu den gemessenen Grundwasserständen im Oktober 1996	M 1:100.000
18d	Berechnete Grundwasserhöhengleichen im Mittleren Grundwasserleiter der Modellverifikation 1996 und Abweichungen zu den gemessenen Grundwasserständen im Oktober 1996	M 1:100.000

Hinweis!

Diesem Bericht liegt eine CD-ROM bei, welche den Berichtstext sowie die Karten 1 bis 18 beinhaltet.

1 EINLEITUNG

Die Länder Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz hatten sich erstmals im Jahr 1973 darauf verständigt, zur Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum, eine Arbeitsgruppe „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum“ einzusetzen.

Der 1. Bericht „Analyse des Ist-Zustandes“ wurde im Jahr 1980 mit dem Kenntnisstand von 1978 veröffentlicht. Der 2. Bericht „Situation heute – Möglichkeiten und Grenzen künftiger Entwicklungen“ wurde 1987 veröffentlicht. Er beinhaltet die Fortschreibung der hydrologischen und hydrogeologischen Daten und Erkenntnisse mit Stand 1983 und zeigt durch den Einsatz eines mathematischen Grundwassermodells die Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Entwicklung auf.

Für die Bearbeitung des vorliegenden 3. Berichtes „Fortschreibung 1983-1998“ gehörten der Arbeitsgruppe – unter der Leitung des Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz – Vertreter der wasserwirtschaftlichen und geologischen Fachbehörden sowie der wasserwirtschaftlichen Mittelinstanzen der drei Länder an. Der Bericht, der auf die beiden Vorberichte aufbaut, umfasst folgende wesentliche Punkte:

1. Fortschreibung der hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Daten für den Zeitraum 1983 bis 1998

- Aufbau und Fortschreibung von geologischen und hydrochemischen Datenbanken, welche länderübergreifend einen Datenaustausch ermöglichen
- Detaillierte Aussagen über Hydrogeologie, Bodenkunde, Hydrologie und Hydrochemie
- Mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (GIS) erzeugte und berechnete geologische, bodenkundliche und hydrologische Karten wie z.B.
 - vieljährige mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Reihe 1961-1993) sowie für die Einzeljahre von 1983 bis 1993
 - Grundwassergleichen, Differenzen von Grundwasserständen, Grundwasserflurabstände
 - Bodenart
 - Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

2. Differenzierte Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit

- Statistische Auswertungen, Analysen und Karten für das Obere, Mittlere und Untere Grundwasser

3. Fortschreibung des großräumigen Grundwassermodelles

- Modellraster verfeinert auf 500 m Knotenabstand
- Differenzierung des Modellaufbaus zur Nachbildung von fünf Grundwasserleitern und vier Trennhorizonten
- Stationäre Anpassung für Oktober 1990
- Instationäre Anpassung der Zeitspanne 1983 bis 1993
- Modellverifikation für 1996 und Prognosevariante 2010

4. Bewertung und Folgerungen

Neben der Zielsetzung, ein fundiertes hydrologisches, geologisches und wasserwirtschaftliches Kartenwerk des Untersuchungsraumes für die Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, wurde erstmals eine flächendetaillierte und tiefendifferenzierte Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit erarbeitet. Die Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ermöglicht Aussagen über das Gefährdungspotenzial hinsichtlich flächenhafter Einträge aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung und gibt Hinweise für zukünftige Planungen, welche mit den Belangen des vorbeugenden Grundwasserschutzes abzustimmen sind.

Die Datenbanken der drei Bundesländer für die Bereiche Hydrogeologie, Bodenkunde, Hydrologie und Hydrochemie sollen die Zusammenführung und Auswertung der Daten für aktuelle Fragestellungen ermöglichen.

Die Hydrogeologische Kartierung mit den Ergebnissen des großräumigen Grundwassermodells soll die Grundlage zur Beantwortung von Fragen des Grundwasserschutzes und der Grundwassernutzung bilden. Dementsprechend werden die Vorgaben der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder bezüglich der zukünftigen Entnahmesituation im Planungsraum in einer Prognoserechnung mit dem Modell umgesetzt. Die vorliegende Datenbasis der HGK muss im Falle weiterführender Untersuchungen – wie z. B. der Aufstellung regionaler Bewirtschaftungspläne – Berücksichtigung finden..

2 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

2.1 Allgemeines

Für das Gebiet Rhein-Neckar-Raum liegen bisher zwei hydrogeologische Kartierungen vor, die den Kenntnisstand des Aufbaus des geologischen Untergrundes und der hydrogeologischen Verhältnisse für unterschiedliche Zeitpunkte und mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten darstellen:

- Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum
 - Analyse des Ist-Zustandes (1980)
- Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum
 - Situation heute, Möglichkeiten und Grenzen künftiger Entwicklungen (1987)

Ein Teil der damals gewonnenen Erkenntnisse besitzt auch heute weiterhin Gültigkeit. Die nachfolgende Zusammenfassung der wichtigsten Punkte soll als Einführung in die Darstellung der neuen Untersuchungsergebnisse dienen. Zeitgleich mit der Bearbeitung des 3. Berichts der HGK flossen die Kenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen in die Bearbeitung für den „Grundwasserbewirtschaftungsplan für das Hessische Ried“ [1] ein. Dieser regionale Grundwasserbewirtschaftungsplan beinhaltet infolge der seinerzeit eingetretenen massiven Grundwasserübernutzung Vorgaben und Bedingungen zur umweltverträglichen Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen.

2.2 Hydrogeologie

Die quartären und pliozänen Lockergesteine des Rhein-Neckar-Raums wurden in den beiden o. g. Kartierungen nach lithostratigraphischen Gesichtspunkten gegliedert und zu Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern zusammengefasst. Das generelle Gliederungsschema gilt im Prinzip auch heute noch. Chronostratigraphisch wurde nach Sedimenten des Jungquartärs, des Altquartärs und des Pliozäns (Tertiär) unterschieden.

Pliozän und Altquartär des Rhein-Neckar-Raums bestehen aus einer Wechsellagerung von Schluff, Ton und Sand. Das Altquartär wurde als Untere sandig-schluffige Abfolge bezeichnet. Es entspricht dem Unteren Grundwasserleiter. Die unterlagernden pliozänen Lockergesteine wurden als pliozäner Grundwasserleiter zusammengefasst. Im Hangenden folgt das Jungquartär, eine Wechselfolge von kiesig-sandigen und feinkörnigeren tonigen bis sandigen Sedimenten. Der Obere Zwischenhorizont (OZH, in der HGK 1980 auch als Oberer Ton bezeichnet) unterteilt das Jungquartär in einen oberen sandig-kiesigen Teil, das Obere Kieslager (OKL; Bezeichnung in Anlehnung an die Gliederung im Raum Karlsruhe-Speyer) und einen unteren Teil, die Mittlere kiesig-sandige Abfolge. Hydrogeologisch entspricht das OKL dem Oberen Grundwasserleiter, die Mittlere kiesig-sandige Abfolge dem Mittleren Grundwasserleiter.

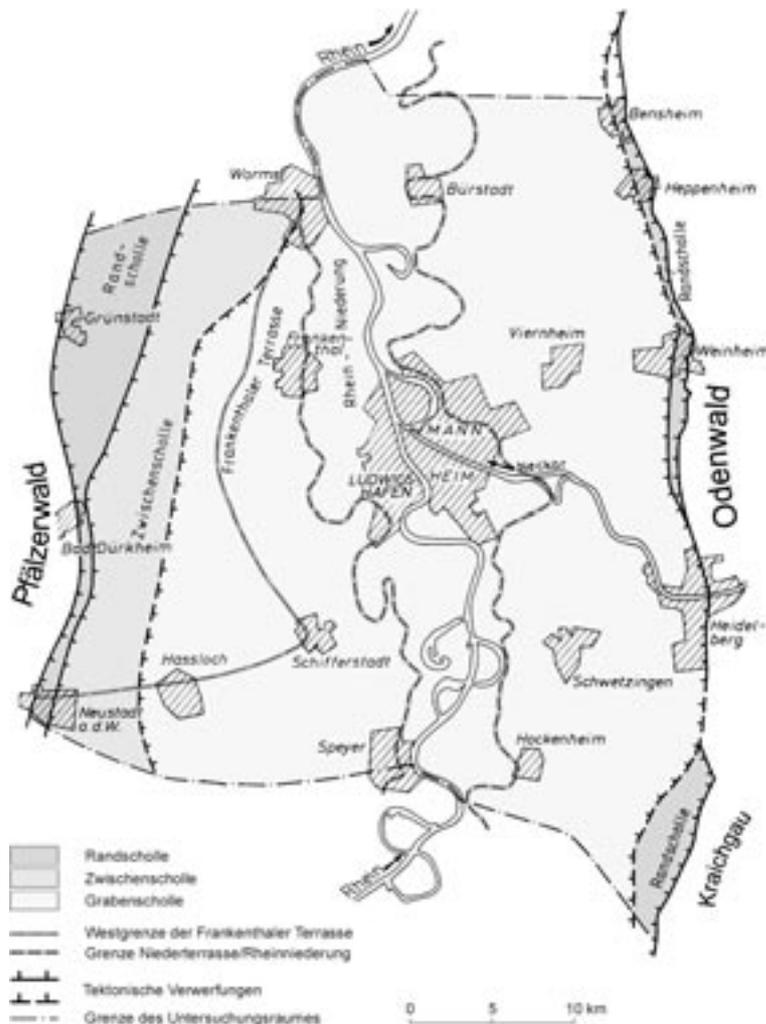
Die Verbreitung des OKL ist im Westen meist durch das linksrheinische Hochgestade des Rheins begrenzt. Die Rheinaue ist erosiv in den OZH eingetieft. Die Möglichkeit zur Untergliederung des OKL wurde schon in der Kartierung von 1987 erwähnt, konnte aber erst in der aktuellen Bearbeitung detailliert auskartiert werden.

Die chronostratigraphische Einstufung der Schichten, die sich besonders in der Kartierung aus dem Jahr 1980 findet, ist nach neuem Kenntnisstand und unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse im gesamten Oberrheinigraben nicht länger aufrechtzuerhalten. Eine abschließende zeitliche Einstufung der Gesteine ist Gegenstand aktueller Forschung.

Weitgehend unverändert wird in der vorliegenden hydrogeologischen Kartierung die tektonische Gliederung des Untersuchungsgebietes übernommen (Abb. 2.1 und 3.2 im Kap. 3):

- westliche Grabenschulter
- Randscholle
- Zwischenscholle
- Grabenscholle
- Randschollen (nur bereichsweise vorhanden)
- östliche Grabenschulter

Abb. 2.1: **Geologisch-tektonische Übersicht des Rhein-Neckar-Raums**



Durch die tektonische Kippung des präquartären Untergrundes im Rhein-Neckar-Raum nimmt die Mächtigkeit der Lockergesteinsfüllung im Oberrheingraben nach Osten zu. Die größten Mächtigkeiten werden im „Heidelberger Loch“ angetroffen.

Bei den vorangegangenen Kartierungen wurden in den hydrogeologischen Schnitten (Anlagen 2 bis 4 in der HGK 1987) die Lockergesteine möglichst überall bis zur „Quartärbasis“ dargestellt. Das früher mit Altquartär bezeichnete Schichtenpaket ist wie das darunter folgende Pliozän rechtsrheinisch kaum durch Bohrungen erschlossen und wasserwirtschaftlich ohne Bedeutung. Lediglich wenige Erdölbohrungen haben diese Schichten erreicht bzw. durchdrungen. Demgegenüber liegt die gesamte Schichtenfolge linksrheinisch wesentlich höher, so dass auch die stratigraphisch tieferen Horizonte durch eine ausreichende Zahl von Bohrungen erkundet sind und wasserwirtschaftlich genutzt werden. In der aktuellen Kartierung wurden in den hydrogeologischen Schnitten nur die tatsächlich genutzten Abschnitte der Schichtenfolge dargestellt, d.h. rechtsrheinisch bis zur Basis der Mittleren sandig-kiesigen Abfolge und linksrheinisch teilweise auch bis zur Basis der Unteren sandig-schluffigen Abfolge.

Die Kartierung aus dem Jahr 1987 enthielt bereits umfangreiche Angaben zu den hydraulischen Kennwerten der Grundwasserleiter (Tab. 3 aus HGK 1987), die bis heute Gültigkeit haben. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls auf die Karte der „Transmissivität des Oberen Grundwasserleiters“ verwiesen, die in der Kartierung aus dem Jahr 1980 als Anlage 6 enthalten ist. In der vorliegenden Bearbeitung wurde exemplarisch ein weitergehender Ansatz für den baden-württembergischen Anteil des Kartiergebiets verfolgt, indem erstmals die Verteilung der Durchlässigkeit tiefendifferenziert in Form von Isolinienplänen dargestellt wurde (Kap. 3.3.2).

2.3 Hydrologie

Für die hydrologischen und hydrochemischen Auswertungen der Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsraum wurde im Hinblick auf die Untersuchungen der 2. Stufe das Grundwassermessnetz erheblich verdichtet. Die Zahl der amtlichen Messstellen erfuhr eine Steigerung von 70 % gegenüber dem Stand 1978 (1. Bericht), so dass 1984 insgesamt rd. 770 Messstellen den Landesgrundwassermessdiensten zur Verfügung standen. Insbesondere hatte der Bau von tiefen Messstellen große Bedeutung.

Die Entwicklung der Grundwasserstände in Abhängigkeit von den Niederschlägen bzw. der Rate der Grundwasserneubildung, den Grundwasserentnahmen und dem Einfluss der oberirdischen Gewässer wurde anhand von Ganglinien einzelner ausgewählter Messstellen bzw. im baden-württembergischen Gebietsteil von sogenannten repräsentativen Gebietsganglinien sowie Grundwassergleichen- und -differenzkarten beschrieben und interpretiert. Zur übersichtlichen Darstellung wurde der Untersuchungsraum in 13 Teilgebiete untergliedert.

In hydrometeorologischer Hinsicht war der 24jährige Zeitraum 1960-1983 weitgehend ausgeglichen, d.h. die mittlere Jahresniederschlagshöhe 1960-1983 entspricht etwa dem Mittel der Referenzreihe 1931-1960. Der Zeitraum war jedoch durch signifikante mehrjährige Trocken- und Nassperioden gekennzeichnet, z. B. durch die Trockenperiode 1971-1977 und die Nassperiode 1965-1970.

Sehr stark durch Entnahmen beeinflusst, vor allem in der ersten Hälfte der 70er Jahre, ist das Teilgebiet „nördliche Frankenthaler Terrasse“ und die westliche Rheinniederung im Raum Ludwigshafen. Dies ist auf die Inbetriebnahme der Wasserwerke Maudach, Mutterstadt, Frankenthal-Nord sowie auf die intensiven Beregnungsentnahmen aus privaten Beregnungsbrunnen zurückzuführen. Der entnahmebedingte Absenkungseinfluss erreichte sein Maximum etwa im Jahr 1977, danach ist ein leichtes Ansteigen der Grundwasserstände im Oberen Grundwasserleiter durch Zurücknahme der Entnahmen festzustellen.

Ein dominierender Einfluss der oberirdischen Gewässer auf die Grundwasserstände ist in den rheinnahen Gebieten erkennbar. Hier sind rheinbedingte Grundwasserschwankungen mit Amplituden bis zu 1,50 m zu verzeichnen. Die im hessischen Teil des Untersuchungsgebietes liegenden Teilgebiete zeigen einen deutlichen Entnahmeeinfluss im Beobachtungszeitraum. Dies ist auf die Inbetriebnahme des Wasserwerkes Jägersburger Wald mit seiner südlichen Brunnengalerie (1969) und die des Hemsbacher Wasserwerkes (1972) zurückzuführen. Auch in diesen Gebieten erreichte der absenkende Entnahmeeinfluss sein Maximum in den Jahren 1976/77. Danach ist ein nahezu gleichbleibender bis leicht ansteigender Verlauf erkennbar. Auf der Niederterrasse der hessischen Rheinebene sind die Auswirkungen vom Wasserwerk Bürstadt auf die Grundwasserstände deutlich erkennbar. Zwischen 1960 und 1976 ist der Grundwasserspiegel um 4,50 m gefallen. Die Grundwasserstände Ende 1983 liegen immer noch etwa 2,00 m unter der Nassperiode der 2. Hälfte der 60er Jahre. Auf der Niederterrasse südlich des Neckars spiegelt sich die Entwicklung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Gebietsganglinie wider. Das Absinken der Grundwasserstände in den Jahren 1962-1964 und 1971-1977 ist besonders ausgeprägt. Auffällig ist, dass auch 1983 kein Wiederanstieg der Grundwasserstände auf die Höhe der 70er Jahre erfolgt ist. Dies dürfte auf die Inbetriebnahme des Wasserwerkes Schwetzingen Hardt (1972) zurückzuführen sein.

Einen flächenhaften Eindruck der Grundwassersituation vermittelt der Grundwassergleichenplan vom Stichtag 03. Oktober 1983. Linksrheinisch fließt das obere Grundwasser vom Pfälzerwald in östlicher Richtung dem Rhein zu. In der Rheinniederung schwenken die Gleichen nach Norden und zeigen einen rheinparallelen Verlauf auf. Im Gebiet Ludwigshafen-Maudach-Roxheim fallen zwei Bereiche mit deutlicher Grundwasser-Depression auf. Sie werden durch die intensive Grundwassernutzung in tieferen Stockwerken in Verbindung mit geringer hydraulischer Trennung des schluffig-tonigen „Oberen Zwischenhorizontes“ hervorgerufen. Der Gleichenplan veranschaulicht weiterhin, dass der Rhein zwischen Altrip und Petersau seine Vorflutfunktion für das Grundwasser verloren hat und in den Oberen Grundwasserleiter infiltriert.

Im gesamten rechtsrheinischen Untersuchungsraum fließt das Grundwasser in westlicher bis nordwestlicher Richtung dem Rhein und dem Unterlauf des Neckar zu.

Aus dem Grundwassergleichenplan für den Mittleren Grundwasserleiter (MGWL) vom 03.10.1983 ist erkennbar, dass im Zentrum des Untersuchungsgebietes der Druckwasserspiegel durch einen ausgedehnten Absenkungstrichter im Bereich Ludwigshafen-Mannheim geprägt wird, da hier große Entnahmen durch Tiefbrunnen erfolgen. Außerdem sind weitere örtliche Absenkungstrichter der öffentlichen Wasserwerke (z. B. Maudach und Frankenthal) zu erkennen. Rechtsrheinisch fließt das tiefere Grundwasser von Ost nach West dem Tiefpunkt des großflächigen Absenkungstrichters zu.

Im hessisch/baden-württembergischen Grenzgebiet kommt dem Absenkungstrichter im Bereich des Wasserwerkes Hemsbach eine regionale Bedeutung zu. Durch eine N-S ver-

laufende Grundwasserscheitelung wird er vom westlich benachbarten Absenkungstrichter des Wasserwerkes Bürstädter Wald getrennt. Die markanten Druckdifferenzen zum oberflächennahen Grundwasserspiegel betragen im Zentrum des großen Absenkungstrichters im Bereich Mannheim-Ludwigshafen bis zu 12,0 m und westlich Hemsbach noch rd. 5,0 m.

Im Jahr 1983 wurden rd. 210 Mio. m³ Grundwasser zur Trink- und Brauchwasserversorgung im Untersuchungsgebiet entnommen. Dies ist eine Minderung von -9 % gegenüber den Entnahmen im Jahr 1976 von 230 Mio. m³. Der Bedarf an Trinkwasser ging von 120 Mio. m³ im Jahr 1976 auf 114 Mio. m³ im Jahr 1983 zurück (-5 %), der Brauchwasserbedarf fiel von 111 Mio. m³ auf 96 Mio. m³ (-14 %).

2.4 Grundwasserbeschaffenheit

Im ersten Bericht „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung des Rhein-Neckar-Raums – Analyse des Ist-Zustands“ (1980) wurden regionale Aussagen über die hydrochemische Beschaffenheit im Oberen Grundwasserleiter (OGWL) getroffen, die im zweiten Bericht 1987 anhand verbesserter hydrogeologischer Kenntnisse mit einer differenzierteren Beschreibung der regionalen Grundwasserbeschaffenheit im OGWL und MGWL fortgeschrieben wurden.

Oberer Grundwasserleiter (OGWL)

Als wichtigste Einflussfaktoren für die Grundwasserbeschaffenheit wurden die Flächennutzung in den Einzugsgebieten sowie die Ausbildung und Mächtigkeit der wasserungesättigten Zone ermittelt. Daneben kann die hydrochemische Zusammensetzung der unterirdischen Randzuflüsse sowie der infiltrierenden oberirdischen Gewässer bedeutsam sein.

Unter Waldflächen mit einer sandig-kiesigen Grundwasserüberdeckung ist eine weitgehend geogene Grundwasserbeschaffenheit anzutreffen, die durch generell niedrige Nitrat-, Sulfat- und Chlorid-Konzentrationen und eine niedrige Gesamthärte charakterisiert ist. Erhöhte Konzentrationen dieser Stoffe weisen auf eine anthropogene Beeinflussung hin, die lokal oder in landwirtschaftlich genutzten Gebieten großflächig auftreten.

Bei flächenhafter Verbreitung bindiger (Auen-)Deckschichten sind häufig reduzierende Grundwasserverhältnisse zu beobachten. Durch verstärkte mikrobielle Aktivität können hier chemische Prozesse geogen erhöhte Sulfatkonzentrationen und Gesamthärten hervorrufen. Niedrige Konzentrationen von Nitrat sind hier meist durch Denitrifikation verursacht.

Im OGWL sind erhöhte Chlorid-Konzentrationen im gesamten Untersuchungsgebiet – mit Ausnahme eines Teilbereichs am westlichen Grabenrand – auf anthropogene Einträge zurückzuführen.

LHKW (leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe) sind im OGWL großflächig im südlichen Stadtgebiet von Ludwigshafen, zwischen Heidelberg und Mannheim und anderen Industriegebieten gefunden worden.

Mittlerer Grundwasserleiter (MGWL)

Die Grundwasserbeschaffenheit des MGWL kann – je nach hydraulischer Situation – durch zuströmendes Grundwasser aus dem OGWL oder den tieferen Grundwasserleitern beeinflusst werden. Vor allem in den Grabenrandbereichen machen sich die Zuflüsse aus den Randschollen häufig hydrochemisch bemerkbar.

Die Stoffkonzentrationen im MGWL sind generell erheblich niedriger als im OGWL. Lokal erhöhte Konzentrationen von Sulfat, Chlorid und der Gesamthärte werden durch Zuflüsse aus dem OGWL erklärt. Bei ausschließlich erhöhten Sulfatgehalten ist die Interpretation unsicher; einerseits werden Konzentrationserhöhungen auf Denitrifikationsprozesse oder randlich zufließendes sulfatreiches Grundwasser aus älteren tertiärzeitlichen Sedimenten zurückgeführt, andererseits wird auch die Herkunft aus aufsteigenden Tiefengrundwässern nicht ausgeschlossen. Salinarwässer aus dem tieferen Untergrund können – besonders in den tieferen Horizonten des MGWL – Ursache für hohe Chloridgehalte sein.

Grundwasseralter

Aussagen über die Grundwasseralter und Mischungsprozesse in den tieferen Grundwasserleitern lieferten Tritium- und Kohlenstoffisotopenbestimmungen. Anhand der Tritiumgehalte im OGWL konnte nachgewiesen werden, dass junge bis sehr junge Grundwässer (<50 Jahre) weit verbreitet vorkommen. Die Untersuchungsergebnisse aus dem MGWL ergaben ¹⁴C-Modellalter von mehreren tausend Jahren. Im Bereich von hydraulisch wirksamen Fenstern im OZH konnten im MGWL durch positive Tritiumbefunde Anteile von jungem oberflächennahem Grundwasser nachgewiesen werden. Daher wurde erwartet, dass im Stadtgebiet von Ludwigshafen und Mannheim aufgrund der großen Potentialdifferenzen zwischen dem OGWL und dem MGWL langfristig eine weitere Verjüngung des tieferen Grundwassers eintritt, begleitet von einer Verschlechterung der Grundwasserbeschaffenheit.

2.5 Mathematisches Grundwassermodell und -bilanz

Im Rahmen der Untersuchungen zur 2. Stufe wurde erstmals ein grenzüberschreitendes, das gesamte Untersuchungsgebiet von rd. 1.500 km² abdeckendes, mathematisches Grundwassermodell erstellt. Das Grundwassermodell wurde generell zweischichtig aufgebaut. Im Bereich des Hockenheimers Rheinbogens wurde auf einer Fläche von rd. 200 km² ein dreischichtiger Modellaufbau gewählt. In der ersten Modellschicht wurde durchweg der gesamte Obere Grundwasserleiter (OGWL) bis zur Oberfläche des Oberen Zwischenhorizonts (OZH) abgebildet. Die darunter folgende Zwischenschicht stellt den OZH, modelltechnisch nach dem Leakage-Prinzip, dar und die vertikale Koppelung zur zweiten Modellschicht her. In der zweiten Modellschicht ist der gesamte Mittlere (MGWL) und Untere Grundwasserleiter (UGWL) mit einer entsprechenden Gesamttransmissivität abgebildet. Im südlichen Bereich wurde der dort ausgeprägteren hydraulischen Trennung durch einen im MGWL liegenden weiteren Zwischenhorizont (sog. ZH 3) Rechnung getragen und das Modell dementsprechend dreischichtig aufgebaut. Als Randbedingungen wurden die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag, die Wechselwirkung mit den oberirdischen Gewässern, die Grundwasserentnahmen sowie die unterirdischen Wasserzutritte an den

Grabenrändern bzw. die Zu- und Abflüsse am nördlichen und südlichen Rand des Untersuchungsgebietes berücksichtigt.

Für den Modellaufbau wurde eine quadratische Netzteilung mit einem 1 km-Raster zugrunde gelegt. Wesentliche Grundinformationen lagen seinerzeit aus den umfangreichen Ergebnissen der 1. Stufe (1980) und den in den beteiligten Ländern bereits durchgeführten Modelluntersuchungen vor. Das Grundwassermodell wurde stationär und instationär geeicht, d.h. es konnte zur Nachbildung zeitlich konstanter (stationärer) und zeitlich veränderlicher (instationärer) Grundwasserverhältnisse eingesetzt werden. Für die stationäre Anpassung wurden die Grundwasserstände in den Herbstmonaten der Jahre 1974 und 1977 als Vergleichsgrößen herangezogen. Zur instationären Anpassung wurden die Grundwasserverhältnisse der Zeitspanne 1970 bis 1983 in Jahresschritten reproduziert.

Mit Hilfe der damals durchgeführten Berechnungen konnte belegt werden, dass in weiten Bereichen des Rhein-Neckar-Raumes die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag die maßgebende Einflussgröße für die Entwicklung der Grundwasserstände zwischen 1970 und 1983 war. Der kleinste Bilanzwert trat mit rd. 66 Mio. m³ 1973 auf, wogegen 1983 mit rd. 234 Mio. m³ Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag der höchste Wert zu verzeichnen war. Längerfristige Schwankungen der Grundwasserstände sind bei konstant hohen Grundwasserentnahmen überwiegend auf unterschiedliche Neubildungsraten und Infiltrationsmengen aus den Gewässern – besonders in der Nähe von Rhein und Neckar – zurückzuführen. In den einzelnen Jahren der gesamten Betrachtungszeitspanne von 14 Jahren schwankten die gesamten Grundwasserentnahmen lediglich zwischen rd. 203 und rd. 232 Mio. m³/Jahr. In Trockenjahren ergaben sich in Teilgebieten erhebliche Grundwasserdargebotsdefizite, die eine optimierte dynamische Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen erfordern [1].

In einigen Teilgebieten jedoch, in denen das oberflächennahe Grundwasser nicht durch die Oberflächengewässer gestützt wird, wirkten sich die Grundwasserentnahmen für die Trink- und Brauchwasserversorgung sowie die Beregnung mit einem deutlich negativen Trend auf das Grundwasser aus.

Neben dem Einsatz des Grundwassermodells zur Analyse der Grundwasserverhältnisse wurde es für Prognosebetrachtungen eingesetzt. Hierbei wurden besonders hohe, besonders niedrige und in absehbarer Zeit (15-25 Jahre) vorstellbare Entnahmesteigerungen für den Bereich der öffentlichen Wasserversorgung in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz untersucht. Das Grundwassermodell wurde seinerzeit von den beteiligten Ländern als prognosefähiges Instrumentarium für zukünftige wasserwirtschaftliche Planungen anerkannt. Das Modell war somit einsatzbereit, um die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der Grundwasserbewirtschaftung vergleichend zu bewerten mit dem Ziel, Nutzungskonkurrenzen am Grundwasserhaushalt möglichst einvernehmlich zu lösen.

Für regionale Untersuchungen zur Überprüfung von Wasserrechten und Wasserschutzgebiete mit Detailmodellen lieferte das großräumige Grundwassermodell die Basisdaten.

Das Modell wurde in den zurückliegenden Jahren mehrfach zur Beantwortung von regional bedeutsamen Fragen zur Grundwasserbewirtschaftung eingesetzt. Daneben wurden auf vielfache Anfrage von Dritten die hydraulischen Randbedingungen aus dem großräumigen Modell für lokale Untersuchungen durch die Fachbehörden zur Verfügung gestellt.

3 GEOLOGIE, HYDROGEOLOGIE

3.1 Allgemeines

Die vorliegende dritte Bearbeitung der Hydrogeologie im Rhein-Neckar-Raum unterscheidet sich von den beiden vorherigen vor allem in methodischer Hinsicht. Erstmals wurden in größerem Umfang die Verfahren der Informations- und Kommunikationstechnologie genutzt. Sowohl Basisdaten als auch Auswertergebnisse sind digital erfasst und liegen in fortschreibungsfähiger Form vor. Sie können in Zukunft ohne großen Aufwand recherchiert, visualisiert und weiterverarbeitet werden.

Inhaltlich ließ sich die Modellvorstellung über die räumliche Verbreitung der Schichten im Oberrheingraben durch die größere Aufschlussdichte, die erst durch die digitale Datenaufbereitung voll ausgeschöpft werden konnte, verbessern und in einigen Bereichen weiter differenzieren. Erstmals wurde zumindest für Teilbereiche die räumliche Verteilung von Durchlässigkeiten in Form von Isolinienplänen dargestellt.

Die Grenzen der hydrogeologischen Bearbeitung entsprechen weitgehend denen der HGK von 1987 (vgl. Abb. 2.1 im Kap. 2 und Karte 1). Im Westen wurde der Bereich der Zwischenscholle nicht berücksichtigt, da der Untergrund dort sehr heterogen aufgebaut ist und die Schichtenfolge mangels ausreichend tieferer Bohrungen nur gebietsweise erfasst werden kann. Im Südwesten im Bereich des Speyerbach-Schwemmfächers konnte der Übergang von der Grabenscholle zu der Zwischenscholle kartiert werden.

3.2 Datenaufbereitung, -auswertung und -archivierung

Erster Schritt der Bearbeitung des hydrogeologischen Untergrundaufbaus war die Erhebung und Dokumentation aller Bohrungen im Kartiergebiet. Die Stammdaten (Lage- und Höhenbezug sowie allgemeine Angaben zum Aufschluss) wurden geprüft, digital erfasst und jeweils in den Datenbanken der Geologischen Dienste der beteiligten Bundesländer archiviert. Die dort verwendeten Stammdatenkonzepte basieren auf dem gemeinsam von den Geologischen Diensten erarbeiteten Datenfeldkatalog für Punktdaten [2]. Die Datenbestände sind deshalb länderübergreifend weitgehend kompatibel und austauschbar.

Bei den als Brunnen oder Grundwassermessstellen ausgebauten Bohrungen erfolgte ein Abgleich der Stammdaten mit den Eintragungen in den Datenbanken der Wasserwirtschaft. Die Datenbestände der Geologischen Dienste und der Wasserwirtschaftsverwaltung können über die wasserwirtschaftliche Kennnummer verknüpft werden.

Neben den Stammdaten wurden auch die Schichtbeschreibungen der Bohrungen für die weitere Auswertung digital erfasst und gespeichert. Grundlage dafür bildet das DASCH-System, das in den beteiligten Geologischen Diensten für die genormten Beschreibungen von Schichtprofilen Verwendung findet [3]. Obwohl dieses System jeweils mit unterschiedlichen Modifikationen zum Einsatz kommt, sind die Datensätze kompatibel.

Die Fortschreibung der Bohrdaten für die Hydrogeologische Kartierung ist im Rahmen der geowissenschaftlichen Landesaufnahme in allen beteiligten Bundesländern gewährleistet. Daten der Bohrlochgeophysik und der Oberflächengeophysik, die ebenfalls in die Konstruktion des hydrogeologischen Baus einfließen, liegen ganz überwiegend in analoger Form vor. Eine nachträgliche Digitalisierung wird wegen des großen Aufwands nur in Ausnahmefällen erfolgen können. Es dürften jedoch in Zukunft mehr und mehr geophysikalische Daten bereits bei den Messungen digital erfasst und dann auch in digitaler Form bei den Geologischen Diensten gespeichert werden.

Auch die für die Beurteilung der Durchlässigkeiten benötigten Pumpversuchsdaten sind bisher in den beteiligten Bundesländern noch nicht systematisch in digitaler Form erfasst. Ein Datenmodell zur Speicherung von Pumpversuchsdaten findet sich im Bericht [2]. Eine Realisierung ist in den Geologischen Diensten der beteiligten Bundesländer für die nächsten Jahre geplant bzw. im Aufbau.

Ein dreidimensionales Modell, das die Verbreitung der hydrogeologischen Einheiten im Untergrund zeigt, wurde durch ein Netz von Schnitten und Schichtlagerungskarten erzeugt. Als Konstruktionsgrundlage für die insgesamt mehr als 25 Schnitte wurden die Säulenprofile der betroffenen Bohrungen mit Hilfe eines Grafikprogramms auf der jeweiligen Schnittlinie dargestellt. Die petrographische Beschaffenheit der einzelnen Schichten wurde entsprechend ihrer Bedeutung für die Hydrogeologie farblich und mittels Übersignatur hervorgehoben. Besonderer Wert wurde auf eine differenzierte Darstellung der feinkörnigen Sedimente gelegt. Für den Abschlussbericht wurden insgesamt vier Längsschnitte und vier Querschnitte ausgewählt und kartographisch bearbeitet (Karten 4, 5 und 6).

Die Abgrenzung und Parallelisierung der hydrogeologischen Einheiten erfolgte manuell. Nach Fertigstellung der Schnitte wurden für die wichtigsten Grenzflächen (Obergrenze und Basis OZH und Obergrenzen ZH2, ZH3 und UZH) Schichtlagerungskarten erstellt. Schnitte und Schichtlagerungskarten wurden iterativ solange verändert, bis ein geologisch plausibles, mit den Beobachtungsdaten übereinstimmendes räumliches Modell entwickelt war. Gliederung, Nomenklatur und Konstruktion sind zwischen den beteiligten Geologischen Diensten abgestimmt. Die erste Bearbeitungsstufe wurde noch länderspezifisch durchgeführt. Die Anpassung und Korrektur der z.T. mit Hilfe grafischer Informationssysteme (ARC/INFO, ARC/VIEW) entwickelten Schichtlagerungskarten erfolgte im Anschluss daran für das gesamte Modellgebiet.

Die Schnitte und Schichtlagerungskarten liegen als digitale Datensätze vor und können bei Bedarf aktualisiert und weiterverarbeitet werden. Die Archivierung der Schichtlagerungskarten umfasst die Umgrenzung des Bearbeitungsgebiets, die Isolinien, evtl. Unstetigkeitsgrenzen wie z.B. Störungen sowie die jeweiligen Belegpunkte. Schnitte und Schichtlagerungskarten können entweder als gedruckte Karte oder in Form digitaler Datensätze ausgegeben werden. Sie lassen sich über Geographische Informationssysteme (GIS) visualisieren.

3.3 Neue hydrogeologische Kenntnisse

3.3.1 Hydrogeologischer Untergundaufbau (Karten 1 bis 6)

Die hydrogeologische Gliederung der Schichtenfolge stimmt weitgehend mit der bisherigen Gliederung überein. Die größere Aufschlussdichte ermöglichte jedoch sowohl im Oberen Kieslager als auch in der Mittleren sandig-kiesigen Abfolge bereichsweise eine weitere Differenzierung (Tab. 3.1).

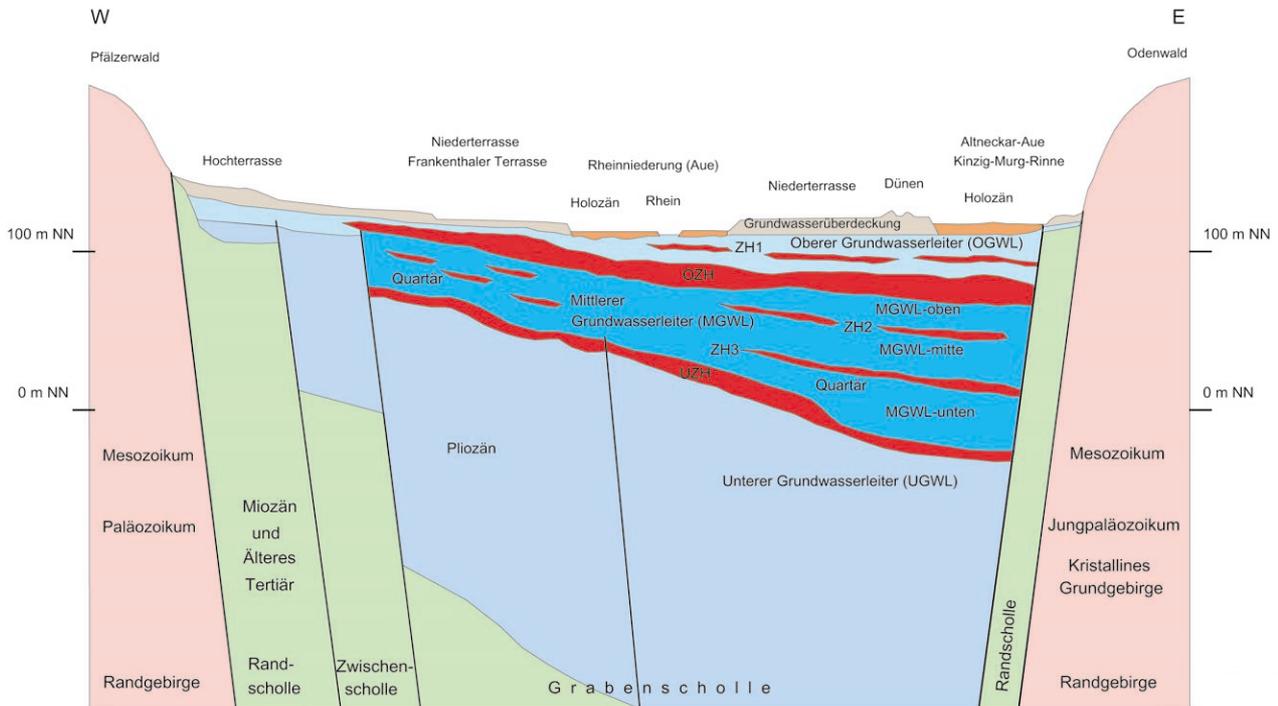
Tab. 3.1: **Lithostratigraphische und hydrogeologische Gliederung der Lockergesteine im Rhein-Neckar-Raum und zum Vergleich die lithostratigraphische Gliederung in der HGK 1987**

Hydrogeologische Kartierung Rhein-Neckar-Raum (1987)		Hydrogeologische Kartierung Rhein-Neckar-Raum (1997-1999)				
<i>Lithostratigraphische Gliederung</i>		<i>Lithostratigraphische Gliederung</i>		<i>Hydrogeologische Gliederung</i>		
Deckschichten	Jungquartär	Deckschichten		Deckschichten		
Oberes Kieslager		Oberes Kieslager (OKL)	oOKL ZH1 uOKL	OGWLo Oberer Grundwasserleiter (OGWL) OGWLu		
Oberer Zwischenhorizont		Oberer Zwischenhorizont (OZH)		Oberer Zwischenhorizont (OZH)		
Mittlere sandig-kiesige Abfolge Unterer Zwischenton		Mittlere sandig-kiesige Abfolge	ZH2 ZH3	MGWLo	MGWLo	MGWLo
				MGWLu	MGWLu	MGWLu
Untere sandig-schluffige Abfolge		Untere sandig-schluffige Abfolge		MGWLu	MGWLu	
Pliozän	Altquartär	(Pliozän)				
Miozän		Miozän		Aquifersohlschicht		

Für die Bezeichnungen der hydrogeologischen Einheiten wurden teils die vorhandenen Begriffe verwendet, teils wurden neue Namen eingeführt. Da einerseits die stratigraphische Zuordnung in weiten Bereichen nach wie vor ungeklärt ist, andererseits die petrographische Beschaffenheit einzelner Horizonte lateral Faziesänderungen aufweist, wurden lediglich grobklastische Abfolgen mit überwiegend sandig-kiesiger und Zwischenhorizonte (ZH) mit überwiegend tonig-schluffig-feinsandiger Zusammensetzung unterschieden (Abb. 3.1).

Die grobklastischen Abfolgen sind Grundwasserleiter (GWL), die Zwischenhorizonte Grundwassergeringleiter (GWG). Eine einheitliche Nomenklatur für den gesamten Bereich des Oberrheingrabens steht noch aus. Problematisch ist vor allem der Übergang der Beckenfazies im Rhein-Neckar-Raum zur Schwellenfazies im südlich anschließenden Raum Karlsruhe-Speyer (vgl. Tab. 3.2).

Abb. 3.1: Schematischer W-E-Schnitt durch den Oberrheingraben im Rhein-Neckar-Raum



Tab. 3.2: Lithostratigraphische Gliederung der Lockergesteine im Rhein-Neckar-Raum und im südlich angrenzenden Raum Karlsruhe-Speyer, schematisch

HGK-Rhein-Neckar-Raum (1997-1999)	HGK Karlsruhe - Speyer Fortschreibung des hydrogeologischen Baus (1987)	
Deckschichten		
oOKL ZH1 uOKL	Oberes Kieslager (OKL)	„Jungquartär“
Oberer Zwischenhorizont (OZH)		
ZH2	Mittleres Kieslager (MKL)	„Altquartär“
Mittlere sandig-kiesige Abfolge ZH3		
Unterer Zwischenhorizont (UZH)		
Untere sandig-schluffige Abfolge	Pliozän (Tertiär)	

Oberer Grundwasserleiter (Karte 1)

Im gesamten rechtsrheinischen Gebiet und bereichsweise auch linksrheinisch ist das Obere Kieslager (OKL) flächendeckend verbreitet und bildet den Oberen Grundwasserleiter (OGWL). Die westliche Verbreitungsgrenze des OKL fällt größtenteils mit dem Verlauf des linksrheinischen Hochgestades zusammen.

Westlich des Sedimentationsraumes des OKL folgen über den Ablagerungen des OZH (s.u.) unterschiedlich ausgebildete, meist nur wenige Meter mächtige, fluviatile Terrassenablagerungen. Sie stellen dort den oberflächennahen Oberen Grundwasserleiter dar. Innerhalb des Speyerbach-Schwemmfächers zwischen Neustadt und Speyer gibt es bereichsweise über oberflächennah anstehenden Ton-Schlufflinsen hangendes Grundwasser, das vom zusammenhängenden oberen Grundwasser abgekoppelt ist.

Die in Karte 1 dargestellte Basis des OGWL bezieht sich auf den großräumig zusammenhängenden Oberen Grundwasserleiter. Kleinräumige Strukturen und lokale Besonderheiten (Rinnen und Schwellenbereiche) sind, insbesondere in dem stärker differenzierten linksrheinischen Gebiet, im Basisplan nicht aufgelöst.

Im OKL treten vor allem im östlichen Bereich des Oberrheingrabens Schluff- und Tonlinsen auf. Auf eine Zerteilung des Oberen Kieslagers in der Umgebung von Heidelberg durch einen schluffigtonigen Zwischenhorizont wurde schon in der Kartierung aus dem Jahr 1987 hingewiesen. Aufgrund der verbesserten Aufschlussdichte konnte dieser als ZH1 bezeichnete Zwischenhorizont jetzt kartiert werden (vgl. Karte 3a). Seine Verbreitung ist rechtsrheinisch auf den östlichen Grabenrand mit Schwerpunkt im Heidelberger Raum beschränkt, wo die gesamte Lokkergesteinsfüllung des Oberrheingrabens ihre größte Mächtigkeit aufweist (Heidelberger Loch). Beim ZH1 handelt es sich vermutlich nicht um einen durchgehenden Horizont als vielmehr um ein Niveau, in dem gehäuft tonig-schluffige Linsen, z.T. in erheblicher Erstreckung, auftreten. Nach Westen verschiebt sich die Zusammensetzung zunehmend nach Feinsand und Sand. Die Mächtigkeit schwankt zwischen 15 m im Osten und 1 bis 2 m im Westen. Der ZH1 trennt den OGWL in einen OGWL-oben (OGWLo) und einen OGWL-unten (OGWLu).

Der ZH1 tritt auch westlich des Rheins auf. Detailbearbeitungen im Raum Ludwigshafen weisen eine im OKL auftretende Ton-Schluffschicht nach. Die Verbreitung und Mächtigkeit des Horizontes in der linksrheinischen Grabenhälfte sind Gegenstand zukünftiger weiterführender Untersuchungen.

Während Grundwasserpotentialunterschiede zwischen dem OGWLo und OGWLu meist nicht nachweisbar oder sehr klein sind, zeigt sich die hydraulische Trennwirkung des ZH1 in der unterschiedlichen hydrochemischen und isotoopenphysikalischen Zusammensetzung der Grundwässer über und unter dem ZH1. Der Horizont hat im Hinblick auf Grundwasserschadensfälle eine besondere Bedeutung, da er die Schadstoffausbreitung in die Tiefe begrenzt bzw. verzögert. Für eine abschließende Beurteilung der hydrogeologischen Bedeutung des ZH1 ist allerdings derzeit die Anzahl der ausschließlich im OGWLo und OGWLu verfilterten Grundwassermessstellen bis auf einzelne Untersuchungsbereiche nicht ausreichend.

Oberer Zwischenhorizont (OZH, Karten 1 und 2)

Der OZH besteht überwiegend aus Ton- und Schlufflagen, bereichsweise auch aus Feinsand. Von Ausnahmen abgesehen wirkt er bei tonig-schluffiger Ausbildung als hydraulischer Trennhorizont. Dies trifft auch dann zu, wenn die Ton- und Schlufflagen nur geringmächtig sind. Der OZH bildet die Basis des OKL bzw. OGWL.

Westlich der Rheinniederung besteht der OZH verbreitet aus einer dünngeschichteten Wechselfolge von Sand und Schluff-Ton. Stellenweise zeigt er auch besonders im mittleren und oberen Teil mächtigere Sandeinschaltungen, die hydraulisch unterschiedlich stark an den OGWL bzw. MGWL angekoppelt sind.

Die Abgrenzung des OZH wurde im Vergleich zu früheren Bearbeitungen modifiziert. Während die obere Begrenzung zum OKL meist durch einen scharfen Wechsel von gröberen Ablagerungen zu Ton, Schluff und Feinsand charakterisiert ist und dann eindeutig festgelegt werden kann, ist die Abgrenzung der unteren Grenzfläche oft problematisch. Die darunter folgende „Mittlere sandig-kiesige Abfolge“ weist bedeutende Anteile an feinkörnigen Sedimenten auf, so dass der Übergang oft unscharf ist. Erschwert wird die Abgrenzung zusätzlich häufig durch eine ungenügende Qualität der Bohrungen (z.B. bei Spülbohrungen) und der mangelhaften Beschreibung der Bohrproben. Geophysikalische Bohrlochmessungen (Gamma-Log, Widerstandslogs) ermöglichen hingegen meist eine genaue Abgrenzung. Die Basis des OZH wurde in Bereichen, in denen auch die unterlagernde „Mittlere sandig-kiesige Abfolge“ feinkörnig ausgebildet ist, an den Übergang zu Mittelsand bzw. zu deutlich mittelsandigen Feinsanden gelegt. Bereichsweise sind in den OZH jedoch auch geringmächtige kiesige Lagen eingeschaltet.

Im Bereich Ludwigshafen/Mannheim konnte der hydrogeologische Untergrundaufbau durch die differenzierte Auswertung zusätzlicher Bohraufschlüsse deutlich feiner aufgelöst werden. Die Strukturen der Schichtgrenzen werden durch den Isolinienverlauf nachgezeichnet. Innerhalb des Schichtpakets OZH lässt sich gebietsweise eine flächenhaft verbreitete Sandeinschaltung mit mehreren Meter Mächtigkeit auskartieren. Sie teilt dort den OZH in eine obere und untere Ton/Schlufflage (OZH1, OZH2). Der zwischengeschalteten Sandschicht dürfte in Verbindung mit der unterschiedlichen Ausbildung der Trennhorizonte im Hangenden und Liegenden für die Migration von Stoffen eine wesentliche Bedeutung zukommen.

Karte 1 stellt die Oberfläche und Mächtigkeit, Karte 2 die Basis, Verbreitung und fazielle Ausbildung des OZH im Kartiergebiet dar.

Mittlerer Grundwasserleiter (MGWL, Karten 3 a bis c)

Die Mittlere sandig-kiesige Abfolge bildet den Mittleren Grundwasserleiter (MGWL). Es handelt sich um eine stark durch Schluff- und Tonhorizonte und -linsen gegliederte Folge von sandigem Kies und Sand.

Horizontbeständige bis mehrere Meter mächtige Schluff- und Tonlagen in der Mittleren sandig-kiesigen Abfolge sind der ZH2, der verbreitet etwa 10 bis 20 m unterhalb des OZH auftritt, sowie der ZH3, früher als Unterer Zwischenton bezeichnet. Die Verbreitung und die Höhenlagen der Oberflächen von ZH1, ZH2 und ZH3 sind in den Karten 3a bis 3c dargestellt.

Je nach Vorhandensein der Zwischenhorizonte kann die Mittlere sandig-kiesige Abfolge als zusammenhängender Grundwasserleiter (MGWL) oder gegliedert in die Teilstockwerke MGWL oben (MGWLo), MGWL Mitte (MGWLM) und MGWL unten (MGWLu) beschrieben werden (Tab. 3.1 und Abb. 3.1). Die Begriffe MGWLo, MGWLM und MGWLu stehen dabei nicht für durchhaltende, stratigraphisch parallelisierbare Einheiten, sondern dienen ausschließlich zur Charakterisierung der jeweiligen Gliederung des MGWL. Die Anzahl der Messstellen, die zur Untersuchung der Teilstockwerke geeignet sind, ist bisher allerdings vor allem auf rechtsrheinischer Seite sehr gering.

Der ZH2 ist rechtsrheinisch etwa 2 bis 4 m mächtig. Er ist in den Profilschnitten dargestellt. Linksrheinisch reicht das Verbreitungsgebiet des ZH2 nach Nordwesten bis an die Grabenschollenverwerfung (Grenze des Kartiergebiets) und nach Süden etwa bis Limburgerhof-Rheinau. In den übrigen Bereichen lässt sich der ZH2 mit den vorhandenen Aufschlüssen nicht flächig nachweisen.

Der ZH3 ist mit Ausnahme im Nordwesten in weiten Bereichen des Kartiergebiets ausgebildet. Es handelt sich vermutlich um ein Tieffenniveau, in dem Linsen aus Schluff und Ton in größerem Umfang auftreten. Die Mächtigkeit der feinkörnigen Einschaltungen liegt etwa zwischen 2-10 m. Im Gegensatz zum ZH2 ist der ZH3 in der westlichen Grabenhälfte im Südteil flächenhaft vertreten. Südlich von Ludwigshafen kommen bereichsweise beide Zwischenhorizonte vor. Dort ist der MGWL besonders stark durch Zwischenhorizonte gegliedert.

Die Fortsetzung des ZH3 nach Süden bis in den Schwellenbereich von Karlsruhe, wo die gesamte Quartärmächtigkeit stark reduziert ist, und die Anbindung an die dortige Schichtenfolge ist problematisch. Bisher wurde angenommen, dass der ZH3 im Raum Karlsruhe den Abschluss des Altquartärs bildet. Nach der derzeitigen Modellvorstellung gehören die untere Mittlere sandig-kiesige Abfolge und der ZH3 jedoch noch dem Jungquartär an und keilen nach Süden hin aus (Tab. 3.2).

Aufgrund der in weiten Bereichen geringen Bohrpunktdichte ist der Isolinienplan der Oberflächen des ZH3 (Karte 3) mit größeren Unsicherheiten behaftet. Viele kleinräumige Strukturen, die sich im Raum Mannheim durch die dort lokal hohe Aufschlussdichte nachweisen lassen, können außerhalb dieses Gebiets nicht mehr aufgelöst werden.

Auf hessischem Gebiet ist eine eindeutige Ansprache von ZH2 und ZH3 problematisch, da sich die Horizonte meist in mehrere Einzellagen auffächern. Zwischen die Niveaus von ZH2 und ZH3 schieben sich weitere Ton-Schlufflinsen. Eine eindeutige Zuordnung kann beim derzeitigen Kenntnisstand nicht vorgenommen werden. Auf die Darstellung von ZH2 und ZH3 auf hessischem Gebiet wird deshalb hier verzichtet.

Unterer Zwischenhorizont (UZH, Karte 3d)

Der tiefste durchgehend kartierbare Horizont der Lockergesteine im Oberrheingraben ist der Untere Zwischenhorizont (UZH). Er trennt den MGWL vom unterlagernden Unteren Grundwasserleiter (UGWL). Die Oberfläche des UZH ist in Karte 3d dargestellt. Der UZH zeigt einen ausgeprägten Versatz zwischen der Grabenscholle und der Zwischenscholle (Querschnitt Q1, Karte 4).

Unterer Grundwasserleiter (UGWL)

Unter dem UZH schließt sich eine Wechselfolge von sandigen und schluffigen Schichten an, die in den älteren Kartierungen teils dem Altquartär, teils dem Pliozän (Tertiär) zugeordnet wurden. Neuere Erkenntnisse zur stratigraphischen Einordnung dieser Folge liegen nicht vor. Besonders in Rheinland-Pfalz kommt dem UGWL wegen seiner relativen Hochlage als tiefes Grundwasserstockwerk wasserwirtschaftlich eine große Bedeutung zu. Eine größere Anzahl von Tiefbrunnen fördern Grundwasser aus diesem Horizont. In der Regel wird der hier integriert betrachtete UGWL aus mehreren mehr oder weniger hydraulisch eigenständigen Teilstockwerken bestehen. Eine differenzierte Beschreibung der Schichtenfolge ist aber mit der aktuellen Datendichte nicht durchführbar.

3.3.2 Hydraulische Eigenschaften

Für den Bereich des Oberrheingrabens in Baden-Württemberg wurden erstmals für die verschiedenen Grundwasserleiter Durchlässigkeitsverteilungen in Form von Isolinienplänen erarbeitet. Die Beurteilung der Durchlässigkeit des OZH ist anhand der auskartierten Faziesbereiche möglich.

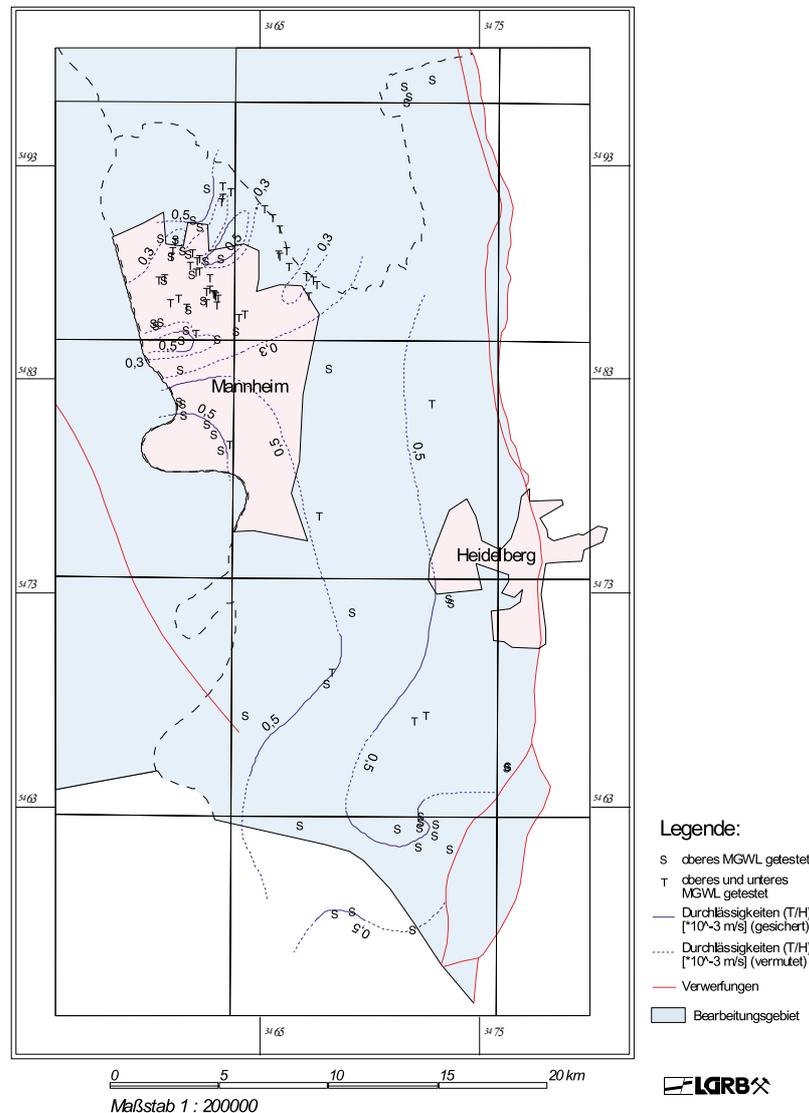
Für die Durchlässigkeitskarten der Grundwasserleiter wurden mehr als 500 Pumpversuche erfasst. Die meisten Pumpversuche wurden neu ausgewertet, je nach Datenlage mit dem iterativen Verfahren von KOZENY, dem Geradlinienverfahren bzw. Wiederanstiegsverfahren von COOPER & JACOB oder mit dem Näherungsverfahren von LOGAN. Einige Ergebnisse konnten aus der Registratur des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg übernommen werden. Aus der mittleren Transmissivität T und der Länge der hydraulisch wirksamen Filterstrecke H wurde die Durchlässigkeit $k_f = T/H$ berechnet.

Die Regionalisierung der punktförmigen Angaben erfolgte unter Berücksichtigung der Qualität der Ergebnisse und getrennt für den OGWL_o, OGWL undifferenziert und den MGWL bis zum ZH3. Das Ergebnis für den OGWL ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Im Gegensatz zu den Abschnitten des Oberrheingrabens weiter im Süden sind die Durchlässigkeiten im OGWL im Gebiet der HGK Rhein-Neckar-Raum weniger differenziert. Es gibt vor allem nur wenige Bereiche mit sehr hohen Durchlässigkeiten ($T/H > 3 \times 10^{-3}$ m/s). Ehemalige Fließrinnen des Rheins pausen sich nur noch schwach in den Durchlässigkeitskarten durch. Scharf abgrenzen lässt sich jedoch besonders im OGWL-oben der Neckarschwemmfächer mit erhöhten Durchlässigkeiten. Sowohl die heutige als auch eine alte Neckarrinne sind an besonders hohen Durchlässigkeiten ($T/H > 10 \times 10^{-3}$ m/s) erkennbar.

Im MGWL-oben findet man über weite Strecken relativ einheitliche Durchlässigkeiten von $T/H = 0,2 \times 10^{-3}$ bis $0,8 \times 10^{-3}$ m/s. Besonders gut dokumentiert ist der Raum Mannheim. Dort deuten Durchlässigkeitswerte zwischen $T/H = 0,15 \times 10^{-3}$ m/s und $T/H = 0,3 \times 10^{-3}$ m/s auch auf einheitliche Verhältnisse im MGWL-unten hin.

Abb. 3.2: Durchlässigkeiten des oberen Teils des Oberen Grundwasserleiters (OGWL)



Über die Durchlässigkeit der Zwischenhorizonte liegen keine neuen Erkenntnisse vor. Einen Anhaltspunkt für die relative Durchlässigkeit des OZH liefern die abgegrenzten Faziestypen (Karte 2). Unterschieden wurde zwischen Bereichen mit überwiegend feinsandiger bis schluffiger und überwiegend schluffig-toniger Ausbildung.

Ziel weiterer Untersuchungen zu den Durchlässigkeiten der Grundwasserleiter in der linksrheinischen Grabenhälfte war die Überprüfung und ggf. Ergänzung der vorliegenden Durchlässigkeitswerte (T/H) aus dem Bericht von 1987 entsprechend dem weiter differenzierten hydrogeologischen Stockwerksbau. Die mit Hilfe von Regressionsanalysen ermittelten Durchlässigkeiten sind in der Tabelle 3.3 aufgelistet. Die Transmissivität wurde an den Aufschlusspunkten anhand der lithologischen Ausbildung für die zugeordneten Grundwasserleiter hochgerechnet. Innerhalb der Grundwasserleiter OGWL und MGWL konnte keine

Tiefendifferenzierung der Durchlässigkeit festgestellt werden. Insgesamt lieferte der OGWL und auch die Terrassenablagerungen um mehr als eine Zehnerpotenz bzw. 2 bis 3-fach höhere Durchlässigkeitswerte als der MGWL.

Tab. 3.3: **Mittlere k_f -Werte der linksrheinischen Grundwasserleiter**

GWL	Stockwerk	k_f -Wert (m/s)			
		Rheinniederung		westliche Terrassen	
		HGK 1987	HGK 1999	HGK 1987	HGK 1999
OGWL	1	0,00086	0,0014	0,00027	0,0007
MGWLo	2		0,0001		0,0003
MGWLM	3		0,0003		0,0001
MGWLu	4		0,0002		0,0003
MGWLo,m	2, 3		0,0002		0,0002
MGWLo,m,u	2, 3, 4	0,0002	0,0002	0,00015	0,00023
MGWLM,u	3, 4		0,00025		0,0002

Mittlere Werte der Grundwasserleiter ohne Ton- und Schlufflagen
 (ermittelt an Regressionsanalysen Transmissivität gegen Mächtigkeit des jeweiligen Grundwasserleiters im betreffenden Gebiet)
 Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz 10/1997

Zu den Speicherkoeffizienten wurden keine spezifischen neuen Untersuchungen durchgeführt. Die in Kapitel 3.2.2.4 des Kartierberichts von 1987 angegebenen Werte haben weiterhin Gültigkeit (Mittelwerte für den ungespannten OGWL von $S = 0.13$ bis 0.16 bei Schwankungen von 0.09 bis 0.21 ; für halbgespannte Verhältnisse $S = 0.04$ bei Schwankungen von 0.01 bis 0.06 ; in gespannten Grundwasserleitern sind die spezifischen S -Werte mit $S = 10^{-5}$ bis 10^{-6} pro Meter Aquifermächtigkeit wesentlich kleiner).

4 HYDROLOGIE

4.1 Messnetze

Das Wasserhaushaltsgesetz und die Landeswassergesetze der Länder verpflichten zu einer mit dem Wohl der Allgemeinheit verträglichen Bewirtschaftung der Gewässer und zu deren Schutz. Das Grundwasser ist hierbei unter besonderen Schutz gestellt. Grundwasser darf nur im Rahmen seiner Neubildung genutzt werden. Dabei gilt der Besorgnisgrundsatz im Hinblick auf mögliche Beeinträchtigungen oder nachteilige Veränderungen.

Die notwendigen Grundlagendaten (Wasserhaushaltsgleichung) werden mit den verschiedenen Messnetzen der gewässerkundlichen Landesmessnetze gewonnen.

Die Wasserhaushaltsgleichung setzt sich aus den Bilanzkomponenten

$$N = V + A_o + A_u + S$$

N	Niederschlag
V	Verdunstung
A _o	Oberirdischer Abfluss
A _u	Unterirdischer Abfluss
S	Speicherung im Aquifer

zusammen.

Dementsprechend gibt es Messnetze zur Beobachtung

- des Niederschlagsgeschehens (Niederschlagssammler/-messer)
- der Verdunstung bzw. Versickerung (Lysimeter)
- des oberirdischen Abflusses (Abflusspegel an Fließgewässern)
- des unterirdischen Abflusses (Grundwassermessstellen)

Für eine ordnungsgemäße Grundwasserbewirtschaftung ist, neben der Beobachtung und Sammlung von quantitativen Daten, ein umfassender Überblick über die Grundwassergüte erforderlich. Im Sinne eines Grundwassermonitorings ist die Grundwassersituation und -entwicklung zu dokumentieren, Einflussfaktoren aufzuzeigen und Verbesserungs- bzw. Eingriffsmöglichkeiten zu beschreiben. Hierfür wurden in den einzelnen Ländern Grundwasserstands- und Grundwasserbeschaffenheitsmessnetze aufgebaut. In der Karte 7 sind jeweils Art und Standorte der Messeinrichtungen dargestellt. Die Messstellendaten werden durch die Landesämter zentral in Datenbanken erfasst, mit entsprechenden EDV-Verfahren aufbereitet und ausgewertet. Sie können für Auskünfte und zur Beratung von Trägern öffentlicher Belange sowie für Dritte zur Verfügung gestellt werden.

Lysimeter

Im Untersuchungsgebiet werden derzeit linksrheinisch fünf und rechtsrheinisch acht Lysimeter in Landesmessnetzen betrieben. Die Beobachtungen dienen der Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag. Darüber hinaus

werden an ausgewählten Standorten die Inhaltsstoffe des Sickerwassers untersucht. Die Lysimeteranlagen sind im wesentlichen in den wichtigsten im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodenarten angeordnet und mit gesonderten Regensammlern zur Erfassung der Niederschlagsmenge ausgestattet.

Pegel an oberirdischen Gewässern

Zur Berücksichtigung der Rheinwasserführung bzw. des Rheinwasserstandes in den grundwasserbezogenen Auswertungen stehen im Untersuchungsgebiet die Pegel Speyer und Mannheim sowie nördlich und südlich außerhalb des Untersuchungsraumes die Pegel Worms und Philippsburg zur Verfügung. Zur Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung des Neckarwasserstands kann auf die Daten des Pegels Heidelberg zurückgegriffen werden. Diese Messstellen werden von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betrieben und Messergebnisse in Jahrbüchern turnusmäßig veröffentlicht. An den Nebengewässern werden linksrheinisch 13 Pegel und rechtsrheinisch 3 Pegel durch die gewässerkundlichen Landesmessnetze betrieben.

Niederschlagsstationen

Vom Deutschen Wetterdienst, den Kommunen und der Wasserwirtschaftsverwaltung der Länder werden insgesamt 26 Niederschlagsstationen betrieben, die gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind. Von einigen Standorten liegen Beobachtungsdaten seit über 60 Jahren vor.

Grundwassermessstellen

Im Vergleich zum Stand der Stufe II des Untersuchungsprogrammes wurden seit 1987 die verschiedenen Grundwassermessnetze im Rhein-Neckar-Raum nur noch geringfügig verdichtet. Die komplexen Strömungsvorgänge in den unterschiedlichen Grundwasserleitern, aber auch im sandig ausgebildeten Bereich des Oberen Zwischenhorizontes, erforderten vor allem für die Beurteilung von Schadensfällen und Altlasten die Verdichtung mit tiefendifferenzierten Messstellen. Aus Kostengründen werden diese Messstellen jedoch meist nicht in die Landesmessnetze übernommen, sondern als Schadens-, Emittenten- oder Vorfeldmessstellen von den Kommunen, der Industrie oder den Wasserversorgungsunternehmen betreut.

In der nachfolgenden Tabelle 4.1 ist die Zahl der Grundwassermessstellen, getrennt nach amtlichen und nichtamtlichen sowie nach Flachmessstellen, welche das oberflächennahe Grundwasser des Oberen Grundwasserleiters (OGWL) und Tiefmessstellen, welche den Abschnitt des Mittleren Grundwasserleiters (MGWL), der durch den Oberen Zwischenhorizont und den Unteren Zwischenhorizont begrenzt wird, aufgelistet. Die entsprechenden Vergleichszahlen vom August 1984 (Stufe II) sind in Klammern gesetzt.

Tab. 4.1: **Anzahl der Grundwassermessstellen** (Stand 01.01.1998)
() = Vergleichszahlen vom August 1984 (Bericht Stufe II)

Teilgebiet Fläche		Baden-Württemberg 505 km ² Anzahl der Messstellen		Hessen 240 km ² Anzahl der Messstellen		Rheinland-Pfalz 680 km ² Anzahl der Messstellen	
amtliche Messstellen	flach	360	(315)	115	(94)	166	(159)
	tief	140	(147)	12	(10)	49	(44)
	gesamt	500	(462)	127	(104)	215	(203)
nicht amtliche Messstellen	flach	630	(350)	229	(164)	61	(204)
	tief	44	(—)	23	(20)	20	(106)
	gesamt	674	(350)	252	(184)	81	(310)
Gesamtzahl der Messstellen	flach	990	(665)	344	(258)	227	(363)
	tief	184	(147)	35	(26)	69	(150)
	gesamt	1174	(812)	379	(288)	296	(513)
km ² /Flachmessstelle		0.5	(0.8)	0.7	(0.9)	3.0	(1.9)
km ² /Tiefmessstelle		2.7	(3.4)	6.9	(9.6)	9.9	(4.5)

Das hydrologische Messnetz zur Beobachtung der Grundwasserstände in Rheinland-Pfalz wurde gegenüber dem Stand vom August 1984 nur geringfügig verdichtet. Mit Stand 01.01.1998 sind in der Tabelle 4.1 die Anzahl der Messstellen angegeben, welche weiterhin wöchentlich einmal beobachtet werden. Für Stichtagsuntersuchungen kann auf eine größere Anzahl (Vergleichszahlen vom August 1984) von nicht amtlichen Messstellen zurückgegriffen werden, da diese Messstellen meist noch zur Verfügung stehen.

Bis zum Jahresende 1996 wurde das Grundwasserstandsmessnetz in Baden-Württemberg einer umfangreichen Optimierung unterzogen. Dabei wurden im Rhein-Neckar-Raum von ehemals insgesamt 500 Grundwasserstandsmessstellen und 14 Lattenpegeln 177 Messstellen im Rahmen der landesweiten Messnetzoptimierung aus der regelmäßigen Beobachtung herausgenommen. Für Stichtagsuntersuchungen kann auf eine weit größere Zahl von Messstellen zurückgegriffen werden (Tab. 4.1), die in der Regel Eigentum von Betreibern kommunaler oder regionaler Wasserversorgungsanlagen sind. Von den acht Lysimeteranlagen werden vier auch künftig weiter beobachtet.

In Hessen wurde das Landesmessnetz in den letzten Jahren nur um wenige Messstellen ergänzt, dafür aber qualitativ verbessert. Anlass dafür war der systematische Aufbau eines Grundwasserbeschaffenheitsmessnetzes im Zuge dessen Messstellen erneuert oder saniert wurden. Ebenso waren die Betreiber von nichtamtlichen Messstellen aktiv und richteten z.B. im Grundwasserzustrom von Brunnen Vorfeldmessstellen ein.

4.2 Grundwasserstand

4.2.1 Allgemeines

Die Veränderungen der Grundwasseroberfläche bzw. des Druckspiegels in den verschiedenen Grundwasserstockwerken sind von mehreren Faktoren abhängig, u.a. vom Nieder-

schlag bzw. der daraus resultierenden Grundwasserneubildung und von den Entnahmen der Wasserwerke, der Industrie und der landwirtschaftlichen Beregnung. In der Nähe von oberirdischen Gewässern, vor allem in den Niederungen von Rhein und Neckar, beeinflussen auch deren Wasserstände die Grundwasserstände.

Die über die Zeit sich ändernden Grundwasserstände geben den Einfluss dieser Faktoren auf den Grundwasserhaushalt in ihrer Summe wieder. Das vieljährige Verhalten der Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet lässt sich durch die Auswertung der Messdaten von repräsentativen Messstellen in Form von Ganglinien darstellen. Die Ganglinien erlauben mehr oder weniger nur punktuelle Aussagen über die Grundwasservorratsänderung im Umfeld der Messstellen. Durch den Vergleich z.B. der Monatsmittelwerte mit den vieljährigen Monatsmittelwerten über einen langen Beobachtungszeitraum spiegeln sich Nass- und Trockenperioden wider. Die vieljährigen Mittelwerte sind die Bezugsgröße für das „mittlere Grundwasserangebot“.

Zeitpunkt, Art und Umfang von Veränderungen werden deutlich, wenn die Ganglinie einer Messstelle, bei der Veränderungen vermutet werden, mit der Ganglinie einer Referenzmessstelle verglichen wird, die hydrologisch ein ähnliches Verhalten zeigt, jedoch aufgrund ihrer Lage von keinen Veränderungen betroffen ist. Dieser Vergleich wird durch die Bildung einer Ganglinie der Differenzbeträge der betrachteten Ganglinien (Differenzganglinie) erreicht.

Die Druck- und Strömungsverhältnisse werden durch Karten der Grundwasserhöhengleichen wiedergegeben. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine hydrologische Momentaufnahme handelt, die auf ein bestimmtes Referenzdatum (Stichtag) bezogen ist. Ergänzend werden die räumlich detaillierten zeitlichen Veränderungen der Grundwasserstände in Form von Karten der Grundwasserspiegeldifferenzen, wiederum bezogen auf diese Stichtage, dargestellt.

4.2.2 Zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände im Oberen Grundwasserleiter

Der Obere Grundwasserleiter (OGWL) umfasst das Obere Kieslager (OKL) oberhalb des Oberen Zwischenhorizontes (OZH). Die Mächtigkeit des OKL schwankt zwischen weniger als 5 m unmittelbar an der Verbreitungsgrenze im Westen und über 60 m im Raum Heidelberg. Die Beobachtung des OGWL mit rd. 640 amtlichen Grundwasserstandsmessstellen sowie rd. 920 Sondermessstellen dient vor allem der Bewertung des natürlichen Schwankungsverhaltens im Oberen Grundwasserleiter infolge der Grundwasserneubildung aus den Niederschlägen, aber auch der Beurteilung möglicher Veränderungen des Grundwasserhaushalts durch Grundwasserentnahmen. Die historischen Datenreihen dienen dem „vorsorgenden Grundwasserschutz“ unter Berücksichtigung der vieljährigen Entwicklung, die von räumlich und zeitlich ganz unterschiedlichen Einflüssen abhängt.

Zur örtlichen Differenzierung der Entwicklung der Grundwasserstände wurde das gesamte Untersuchungsgebiet bereits in der Stufe II (1987) in 13 Teilgebiete aufgeteilt. Davon liegen sechs in Rheinland-Pfalz, vier in Baden-Württemberg und drei in Hessen (Karte 16a). In der Stufe II (1987) wurden beispielhaft historische Ganglinien für den Zeitraum 1913/14 bis 1983 vorgestellt und in den Teilgebieten die Wasserstandsschwankungen der Zeitreihe 1960 bis 1983 interpretiert. In diesem Bericht wird die aktuelle Entwicklung der Grundwasserstände für den Zeitraum 1970 bis 1998 betrachtet. Die Grundwasserneubildung findet hauptsächlich in der vegetationsfreien Zeit, d.h. im hydrologischen Winterhalbjahr zwischen November

und April statt. Dadurch entsteht ein typischer jahreszeitlicher Verlauf des Grundwasserstandes mit einem Anstieg über die Wintermonate und einem stetigen Absinken während der Vegetationsperiode bis zum Herbst. Obwohl ca. 60 % der Niederschläge im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) fallen, haben diese nur geringen Einfluss auf die Grundwasserneubildung, da in dieser Zeit sowohl die Verdunstung als auch die Wasseraufnahme durch die Pflanzen am höchsten ist.

Am Beispiel der Niederschlagsmessstation Hochdorf (Abb. 4.1) und der Ganglinie der Grundwasserstandmessstelle Nr. 1091 Fußgönheim (Abb. 4.2) werden die Nass- und Trockenperioden beschrieben.

Abb. 4.1: Niederschlagssummen der Niederschlagsmessstelle Hochdorf

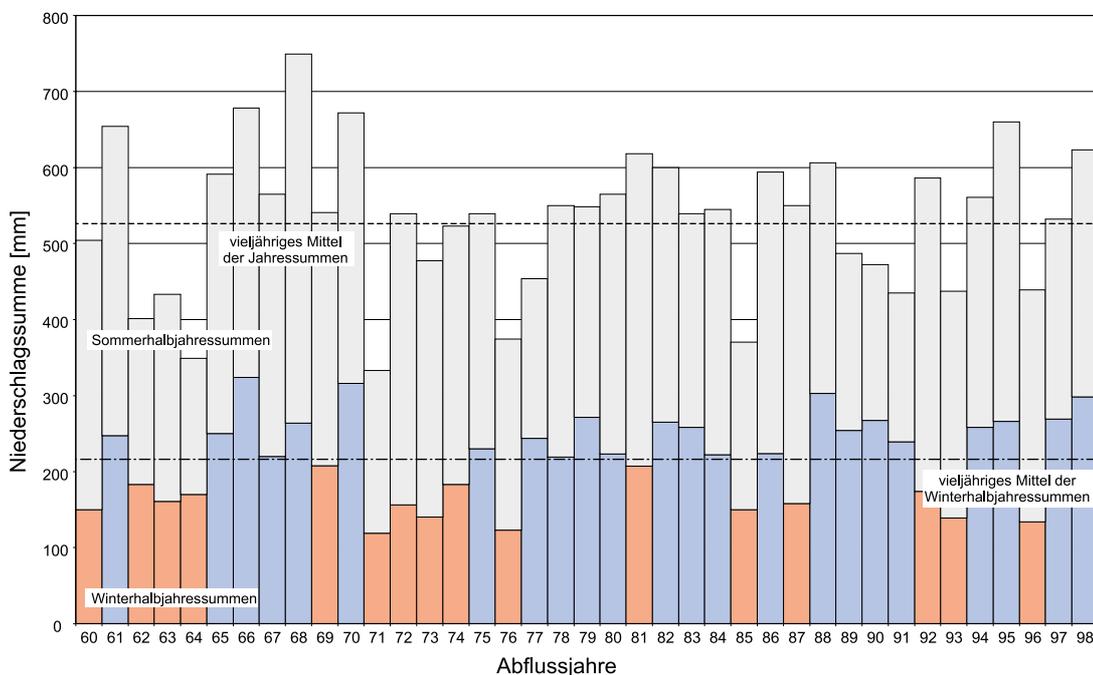
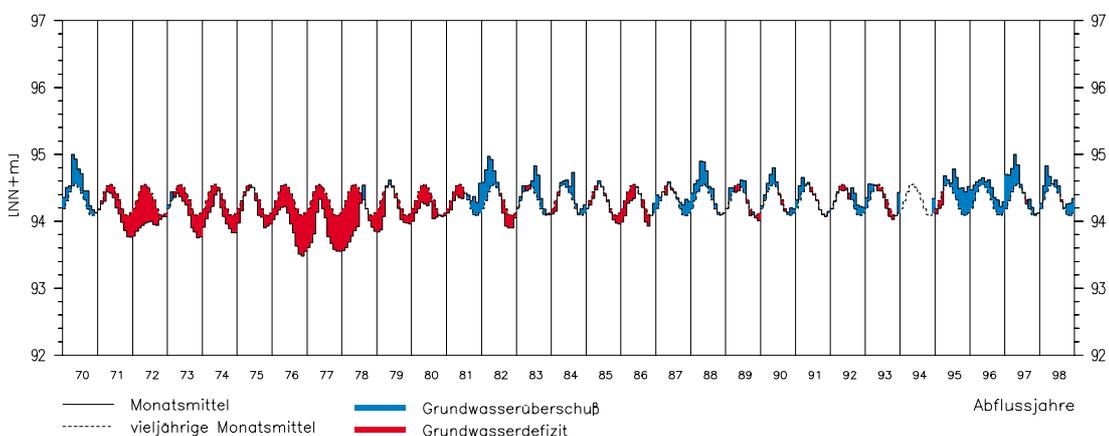


Abb. 4.2: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1091 Fußgönheim



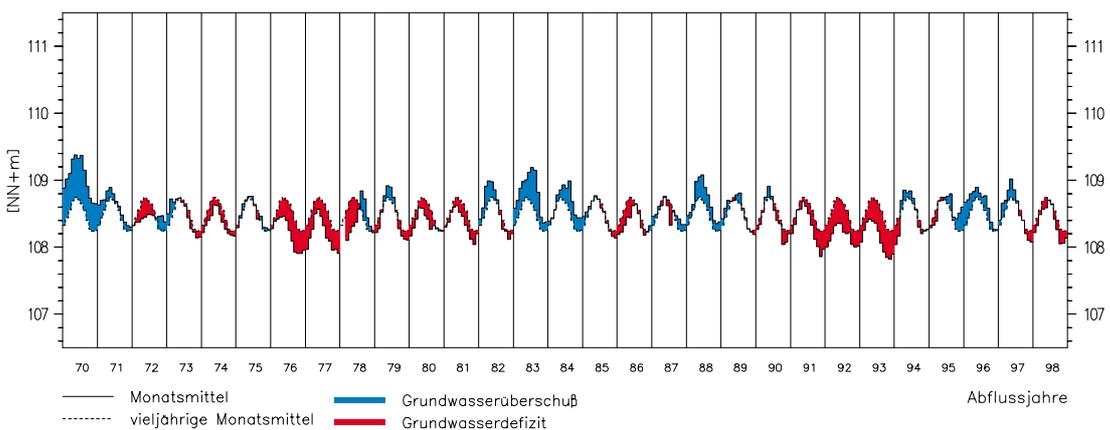
Das Abflussjahr 1970 lag mit seinen Niederschlagssummen und den Grundwasserständen noch deutlich über den vieljährigen Mittelwerten. Ab dem Jahr 1971 bis 1977 folgte eine Trockenperiode mit den niedrigsten Grundwasserständen im Jahr 1976. Überdurchschnittliche Winterhalbjahressummen des Niederschlages in den Jahren 1977 bis 1984 führten zum allmählichen Anstieg der Grundwasserstände, 1981 erreichten sie die vieljährigen Mittelwerte, 1982 bis 1984 bestand wieder ein Grundwasserüberschuss. Defizitäre Niederschläge der Jahre 1985 und 1987 verursachten wiederum ein Absinken der Grundwasserstände, darauf folgte eine Nassperiode von 1988 bis 1991. 1992 und 1993 fielen die Grundwasserstände infolge geringer Winterniederschläge unter die vieljährigen Mittelwerte. In den Jahren 1994 und 1995 stiegen die Grundwasserstände wieder über die Mittelwerte an, die geringen Winterhalbjahressummen des Niederschlages im Abflussjahr 1996 ließen die Grundwasserstände erneut in den Bereich der Mittelwerte fallen, an anderen Messstellen im Untersuchungsraum lagen die Grundwasserstände Ende 1996 auch schon merklich unter den vieljährigen Mittelwerten. Die Winterhalbjahressummen 96/97 sowie 97/98 lagen wiederum über dem vieljährigen Mittel und führten zu einer Erholung der Grundwasserstände, sie lagen am Ende der Beobachtungszeit meist wieder über den vieljährigen Mittelwerten.

Entwicklung der Grundwasserstände in den Teilgebieten

Teilgebiet 1 Westlicher Speyerbach-Schwemmfächer

Der ausgeprägte Jahresgang des Grundwassers ist typisch für Grundwasserregionen mit niedrigen Flurabständen. Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr und Grundwasseraufbrauch im Sommerhalbjahr erfolgen ohne große zeitliche Verzögerung. Die nur geringe Schwankungsamplitude der Grundwasserstände um die vieljährigen Monatsmittelwerte von -0,4 bis +0,6 m, auch bei extremen Witterungsverhältnissen, wird auf den regulierenden Einfluss der Bäche zurückgeführt (Abb. 4.3).

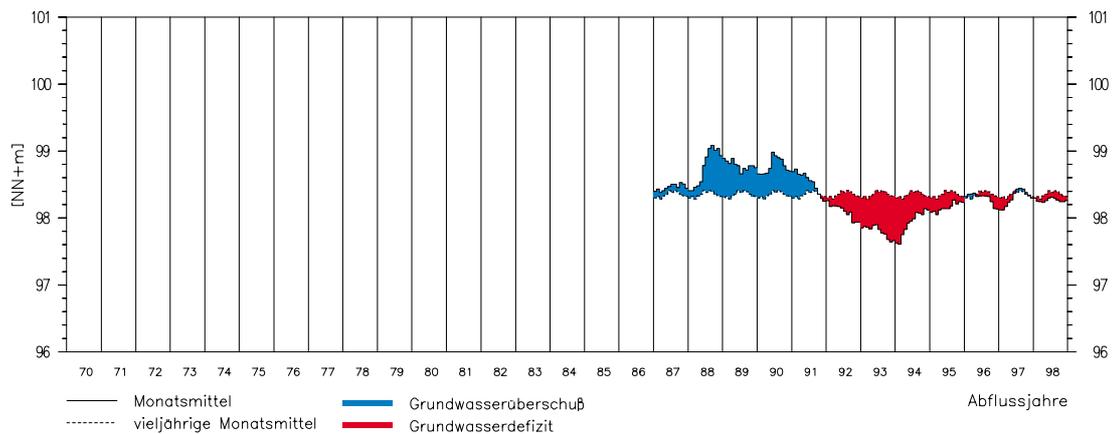
Abb. 4.3: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1211 Haßloch



Teilgebiet 2 Hügelland westlich der Frankenthaler Terrasse

In der Vorbergzone (Riedelbereich) existieren nur wenige Messstellen seit Mitte der 80er Jahre, da in diesem Bereich nur sehr geringe Grundwassermengen abfließen. Die Grundwasserflurabstände betragen mehr als 10 m, so dass sich die Grundwasserneubildung zeitlich verzögert widerspiegelt bzw. der typische Jahresgang stark gedämpft wird (Abb. 4.4).

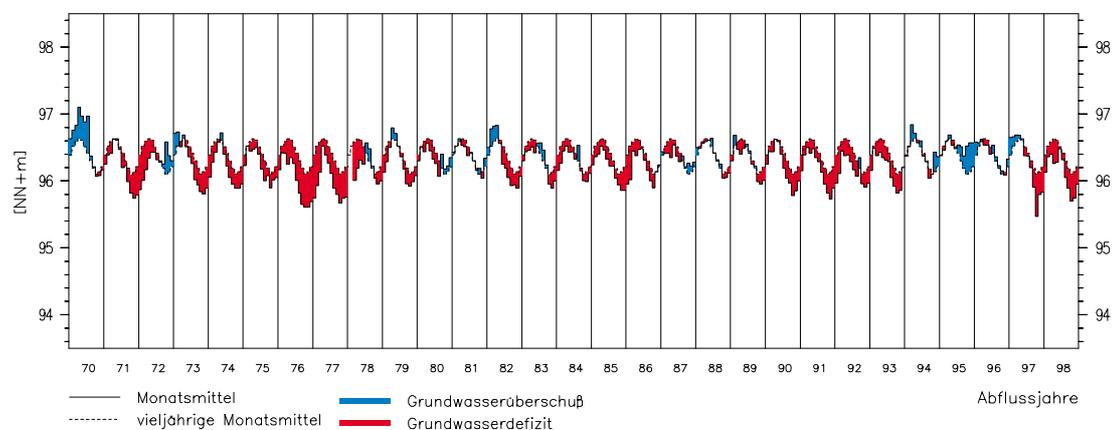
Abb. 4.4: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1445 Ellerstadt



Teilgebiet 3 Niederterrasse der übrigen Haardt-bäche im Bereich Haßloch-Schifferstadt-Schauernheim

Dieses Teilgebiet weist einen ähnlichen Verlauf der Grundwasserganglinien wie im Teilgebiet 1 auf. Die Schwankungsbreite um die vieljährigen Monatsmittelwerte beträgt rd. $\pm 0,40$ m (Abb. 4.5).

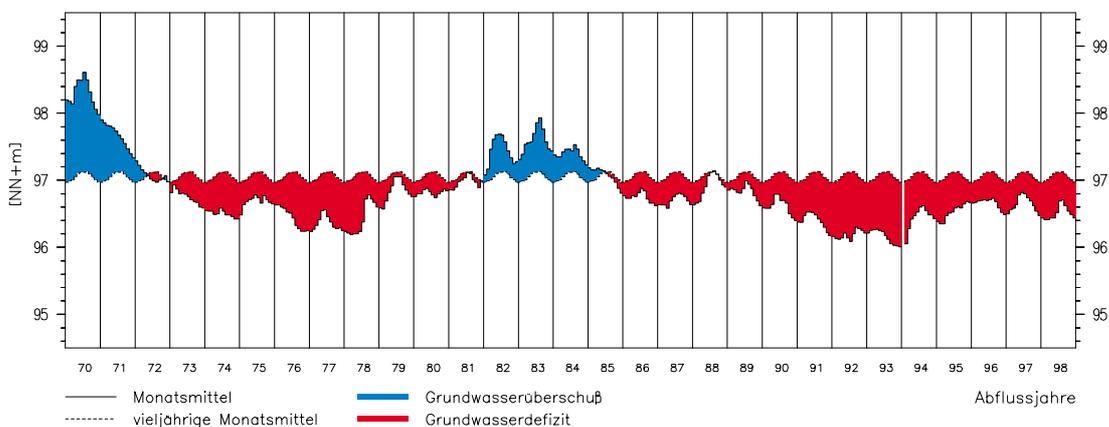
Abb. 4.5: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1068 Dannstadt-Schauernheim



Teilgebiet 4 Südlicher Rand der Frankenthaler Terrasse und östlicher Speyerbach-Schwemmfächer

In diesem Teilgebiet liegen die Flurabstände bei 2 bis 3 m u. Gelände. Der typische Jahresgang ist aufgrund der zeitlich verzögerten und geringen Grundwasserneubildung stark gedämpft. Die Ganglinien spiegeln vielmehr Grundwasserbevorratung oder -aufbrauch gegenüber den Nass- bzw. Trockenperioden wider. Auffällig ist das Absinken der Grundwasserstände an der Messstelle Nr. 1061 Speyer (Abb. 4.6) seit 1989 mit einem Tiefstand Ende 1993. Auch im Abflussjahr 1998 liegen die Wasserstände noch rd. 0,5 m unter den vieljährigen Mittelwerten. Möglicherweise werden die Grundwasserstände durch Grundwasserentnahmen im weiteren Umfeld negativ beeinflusst.

Abb. 4.6: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1061 Speyer

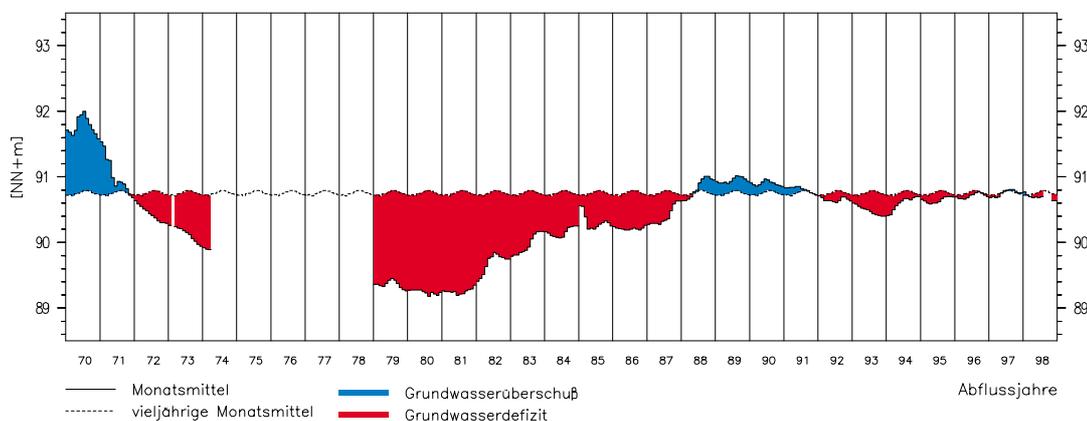


Teilgebiet 5 Frankenthaler Terrasse und westliche Rheinniederung (Ludwigshafen-Frankenthal)

Der Grundwasserspiegelgang der Messstelle Nr. 1103 A Frankenthal (Abb. 4.7) ist typisch für den nördlichen Bereich der Frankenthaler Terrasse mit größeren Flurabständen. Die geringe Grundwasserneubildung in den Jahren 1971 bis 1976 bewirkte ein stetiges Absinken der Grundwasserstände. 1974 fiel die alte Messstelle trocken, 1979 wurde mit einer Ersatzmessstelle die Beobachtung fortgesetzt. Auffallend an der Ganglinie ist, dass im Gegensatz zu den übrigen Teilgebieten eine Erholung der Grundwasserstände nur sehr langsam stattfindet.

Während die Grundwasserstände im übrigen Untersuchungsraum in den Jahren 1981/82 bereits wieder mittlere hydrologische Zustände widerspiegeln, liegen die Wasserstände der Messstelle Nr. 1103 A noch rd. 1,50 m unter dem vieljährigen Mittel.

Abb. 4.7: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1103 A Frankenthal

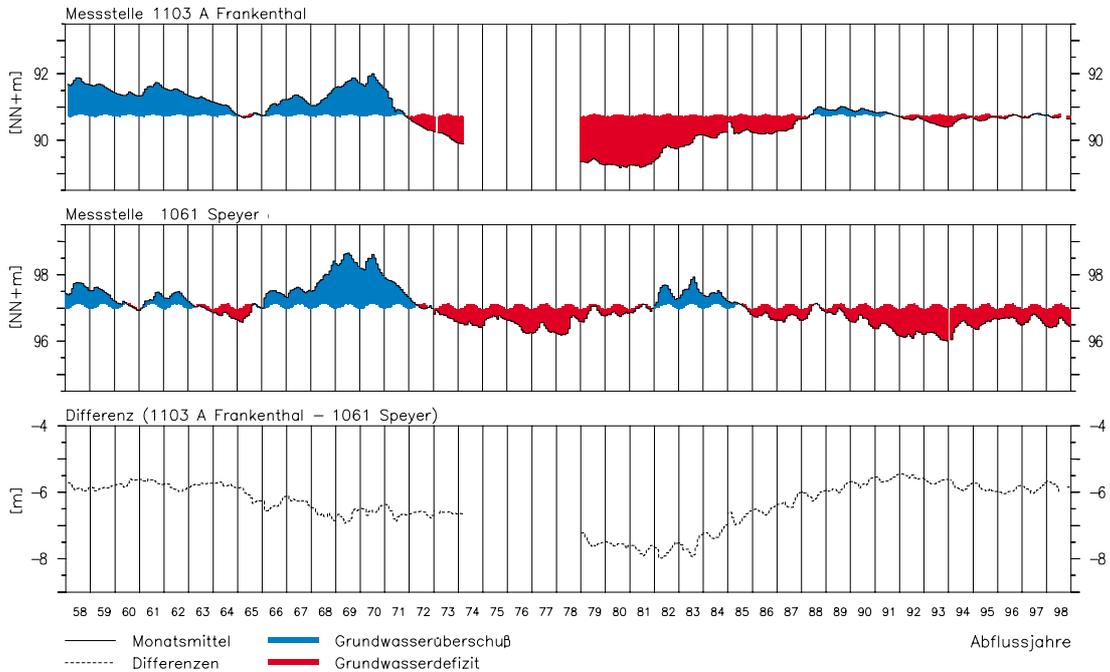


Das überproportionale Absinken der Grundwasserstände im Teilgebiet 5 lässt sich durch die großflächige Beregnung der Gemüseanbaukulturen seit Mitte der 60er Jahre aus einer Vielzahl von privaten Beregnungsbrunnen begründen. Mitte der 80er Jahre wurde geschätzt, dass bis zu 10 Mio. m³/a aus diesen Privatbrunnen gefördert wurde. Die extreme Absenkung der Grundwasserstände auf der Frankenthaler Terrasse veranlasste die Wasserwirtschaftsverwaltung, die Beregnung auf Oberflächenwasser aus dem Otterstädter Altrhein umzustellen und die Privatbrunnen sukzessiv zu schließen. Der Beregnungsverband lieferte von 1976 bis 1981 rd. 4,0 Mio. m³/a Beregnungswasser, in den nachfolgenden Jahren bis 1988 rd. 7,0 Mio. m³/a und seit 1989 bis 1998 zwischen 10,0 bis 15,0 Mio. m³/a. Die private Beregnung ist mittlerweile bis auf die Frostschutzberegnung völlig eingestellt worden.

Die positive Entwicklung der Grundwasserstände im Teilgebiet 5 lässt sich deutlich am Vergleich mit der Ganglinie einer unbeeinflussten Messstelle aus dem Raum Speyer erkennen. Hierzu wurde die Differenzganglinie zwischen den Messstellen Nr. 1103 A und 1061 (Abb. 4.8) berechnet und dargestellt.

In einem natürlichen, unbelasteten Zustand müssten sich die Differenzwerte auf dem gleichen Niveau über die Jahre bewegen (horizontale Gerade). Fällt die Differenzganglinie ab, so ist eine der beiden Messstellen über die Jahre durch Grundwasserentnahmen beeinflusst. Die Differenzganglinie zeigt den unbeeinflussten, horizontalen Verlauf von 1958 bis 1964, danach ein stetiges Absinken bis 1983, verursacht durch Beregnungsentnahmen aus dem oberflächennahen Grundwasser die den Grundwassergang an der Messstelle 1103 A negativ beeinflussten. Mit der Bereitstellung von Beregnungswasser aus dem Rhein erholten sich die Grundwasserstände an der Messstelle Nr. 1103 A und dementsprechend stieg die Differenzganglinie bis 1991 kontinuierlich an, danach zeigte sie wieder einen unbeeinflussten, horizontalen Verlauf. Heute liegen die Grundwasserstände im Teilgebiet 5 wieder auf dem natürlichen, von Entnahmen unbeeinflussten Niveau.

Abb. 4.8: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Messstellen Nr. 1103 A und 1061



Teilgebiet 6 Rheinbarer Streifen von rd. 2 km Breite, linksrheinisch

Die Grundwasserstände in diesem Teilgebiet werden von den Wasserständen des Rheins dominant beeinflusst. Der Rhein ist Vorfluter für das oberflächennahe Grundwasser, dementsprechend stellen sich die Grundwasserstände auf die Rheinwasserspiegelschwankungen ein. In der Abbildung 4.9 sind die Monatsmittelwerte der Rheinwasserstände bzw. die vieljährigen Monatsmittelwerte am Pegel Mannheim dargestellt. Seine Wasserstandsganglinie spiegelt das meteorologische Geschehen im Einzugsgebiet des Rheins über den Beobachtungszeitraum wider. Niedrigen Rheinwasserständen von 1971 bis 1974 bzw. 1976 folgten hohe Wasserstände ab 1977 bis 1983. 1984 und 1985 lagen die Wasserstände auf mittlerem Niveau, von 1989 bis 1993 folgte wiederum eine defizitäre Periode. 1994 und 1995 lagen sie wiederum über dem vieljährigen Mittel, wobei 1996 ein weiteres Trockenjahr folgte. Auch in den darauffolgenden Jahren 1997 und 1998 lagen die Rheinabflüsse am Pegel Mannheim meist unter den vieljährigen mittleren monatlichen Abflüssen. Das gleiche Schwankungsverhalten ist im Grundwasserstand an der Messstelle Nr. 1073 Altrip (Abb. 4.10) erkennbar.

Teilgebiet 7 Rechtsrheinische Rheinniederung südlich Mannheim

Dieses Teilgebiet entspricht in seiner grundwasserhydrologischen Charakteristik im wesentlichen dem gegenüberliegenden linksrheinischen Teilgebiet 6. Der Rhein ist im gesamten Teilgebiet Vorflut für das oberflächennahe Grundwasser und dementsprechend rheinabhängig stellen sich die Grundwasserspiegelschwankungen dar (Abb. 4.11). Von 1971 bis 1974 bzw. 1976 herrschten unterdurchschnittliche Grundwasserstände vor, denen ab 1977 bis 1983

Abb. 4.9: Rheinwasserstandsganglinie am Pegel Mannheim

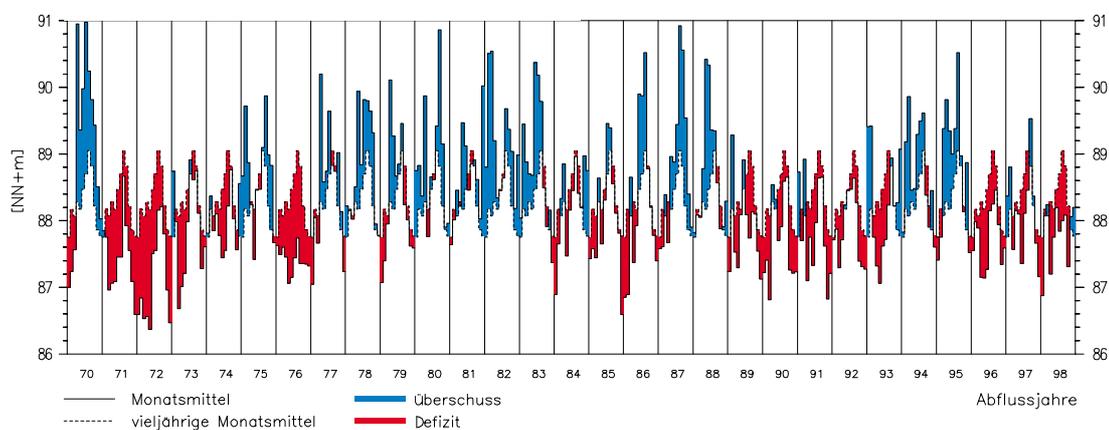


Abb. 4.10: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 1073 Altrip

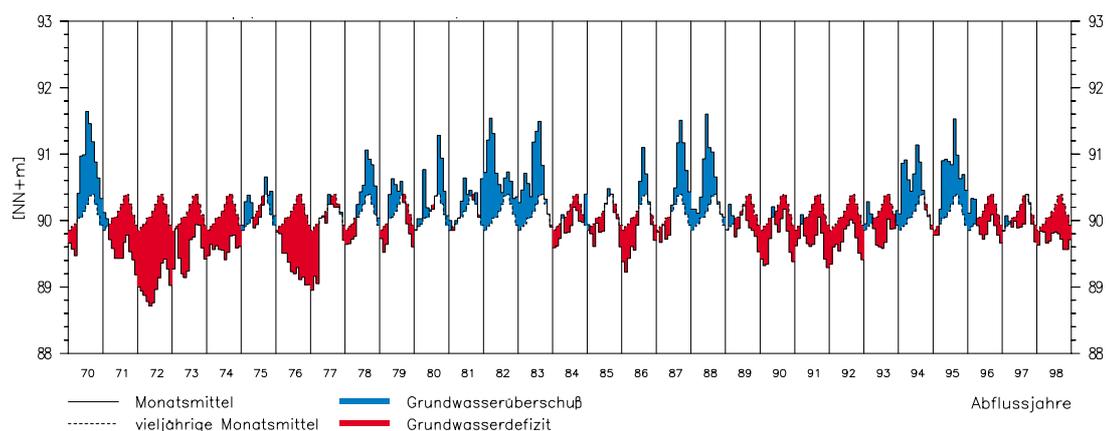


Abb. 4.11: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 100/256 Altlußheim

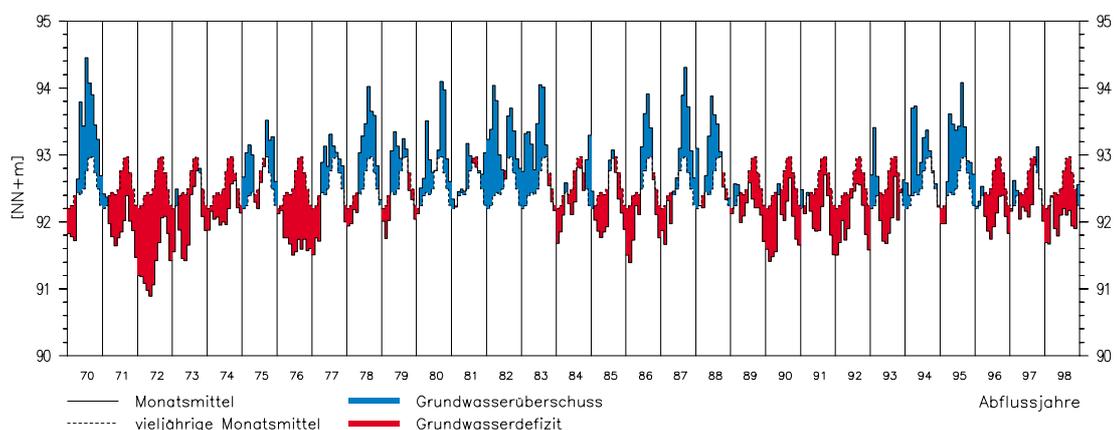


Abb. 4.12: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 103/256 Hockenheim

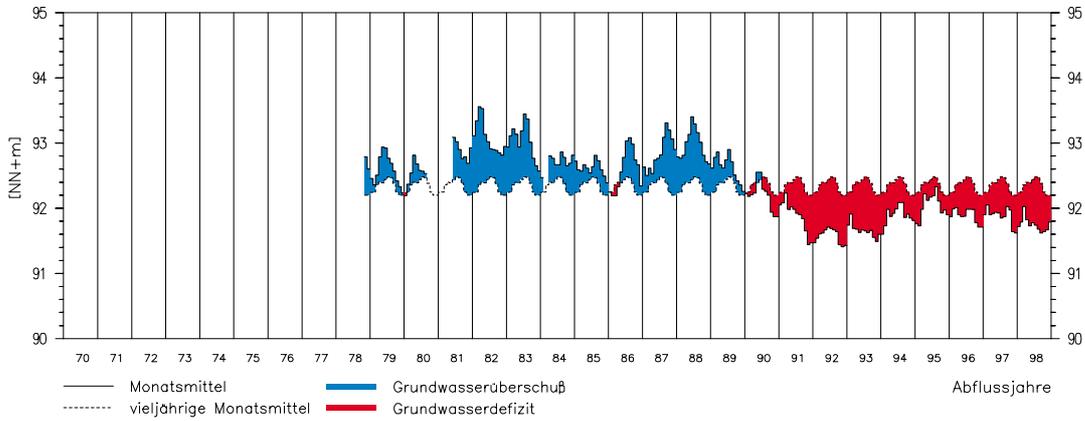


Abb. 4.13: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 118/254 Mannheim-Scharhof

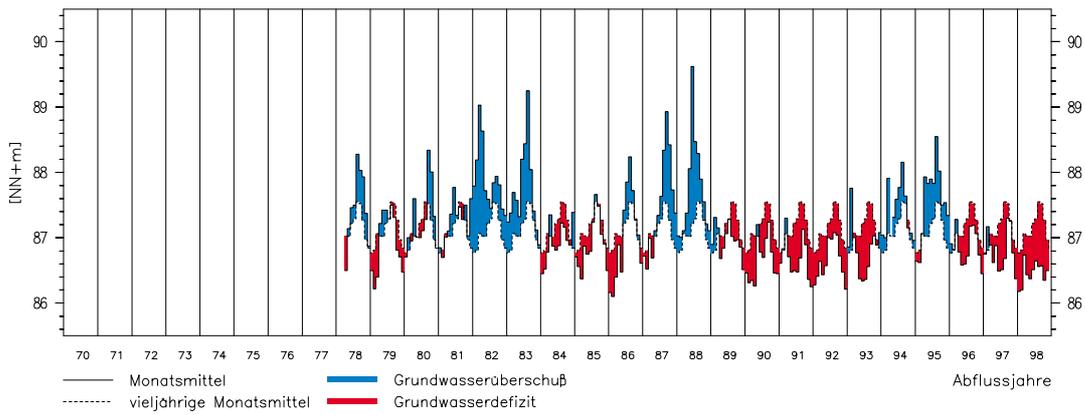
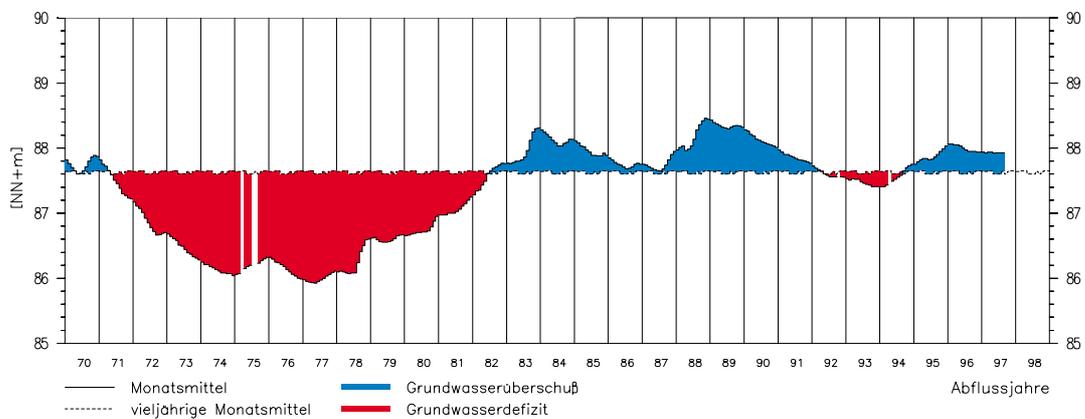


Abb. 4.14: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 106/254 Gartenstadt



hohe Grundwasserstände folgten. 1984 und 1985 lagen die Grundwasserstände im wesentlichen auf mittlerem Niveau, an die sich eine dreijährige Periode mit meist überdurchschnittlich hohen Grundwasserständen anschloss. Von 1989 bis 1993 folgte wiederum eine mehrjährige defizitäre Periode. 1994 und 1995 herrschten wiederum überdurchschnittlich hohe Grundwasserstände vor, denen jedoch ab 1996 bis 1998 weitere Jahre mit Grundwasserständen unterhalb der vieljährigen Mittelwerte folgten. In etwas rheinfernen Bereichen dieses Teilgebietes lassen sich längere zusammenhängende Perioden über- bzw. unterdurchschnittlicher Grundwasserstände feststellen (Abb. 4.12).

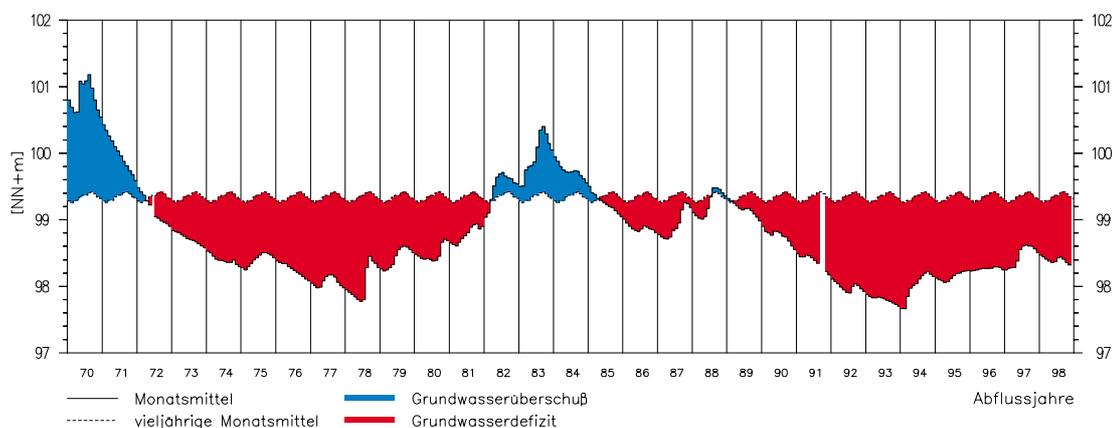
Teilgebiet 8 Großraum Mannheim

In diesem Teilgebiet ist der Einfluss des Rheins auf den Gang des Grundwasserspiegels bereichsweise deutlich erkennbar. Für diese vom Rhein stark geprägten Bereiche gilt die detaillierte Beschreibung der Abfolge von Nass- und Trockenperioden aus dem Teilgebiet 7 gleichermaßen (Abb. 4.13). Im Teilgebiet 8 sind daneben auch weitere Bereiche mit vergleichsweise großem Einfluss der Grundwasserneubildung und -förderung vorhanden. Der Einflussfaktor Grundwasserneubildung aus Niederschlag wird beispielsweise durch die Ganglinie der Grundwasserstandsmessstelle Nr. 106/254 Gartenstadt (Abb. 4.14) dokumentiert.

Teilgebiet 9 Niederterrasse südlich des Neckars (Raum Schwetzingen-Hockenheim-Walldorf)

Hier wird der Gang der Grundwasseroberfläche stark durch die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag beeinflusst, da die Flurabstände ausreichend groß sind, Rhein und Neckar allenfalls in Randbereichen als Vorfluter beeinflussen und Böden sowie Flächennutzung eine entsprechende mengenmäßige Regeneration zulassen. Im Gang des Grundwasserstands an der Messstelle Nr. 109/306 St. Ilgen (Abb. 4.15) zeigt sich die wesentliche Abfolge neubildungsarmer und -reicher Perioden zwischen 1970 und 1998. Ausgehend von einem sehr hohen Niveau im Jahr 1970 schloss sich eine mehrjährige sehr neubildungsarme Periode an, die den Grundwasserstand an der Messstelle um über 3 m bis zum Jahr 1978 fallen ließ. Die daran anschließende Periode mit überdurchschnittlicher Neubildung (Sickerwassergang der

Abb. 4.15: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle Nr. 109/306 St. Ilgen



Messstelle Nr. 503/306, Abb. 4.16) führte den Grundwasserstand im Jahr 1983 auf ein Hoch, welches jedoch nicht das Niveau des Jahres 1970 erreichte. Bis 1986 fiel der Grundwasserstand wieder auf ein etwa mittleres Niveau. Durch die 1989 beginnende neuerliche Abfolge neubildungsarmer Jahre wurde ein bis 1993 anhaltendes Absinken der Grundwasseroberfläche in einen deutlich defizitären Bereich bewirkt, der auch bis 1998 noch nicht wieder ausgeglichen werden konnte.

Abb. 4.16: Niederschlagsganglinie (Monatssummen) und Sickerwasserganglinie (Monatssummen) der Messstellen Nr. 403/306 und 503/306 Sandhausen

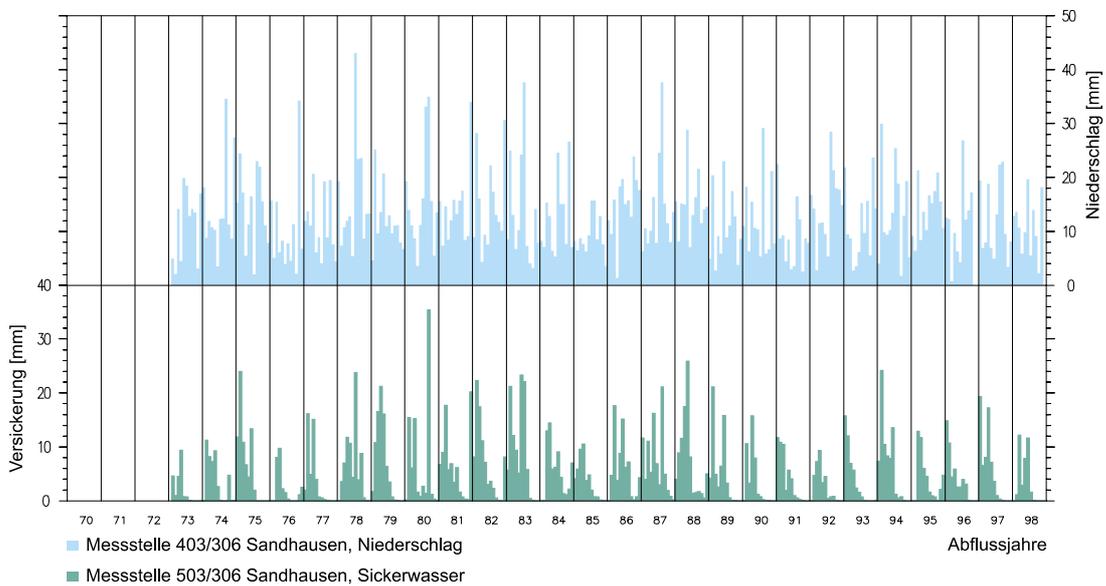
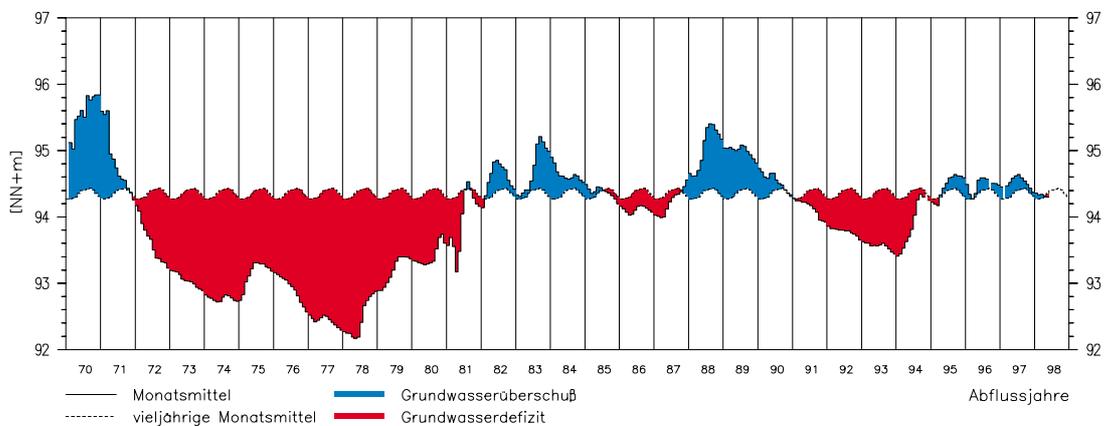


Abb. 4.17: Grundwasserstandganglinie der Messstelle Nr. 113/304 Heddesheim



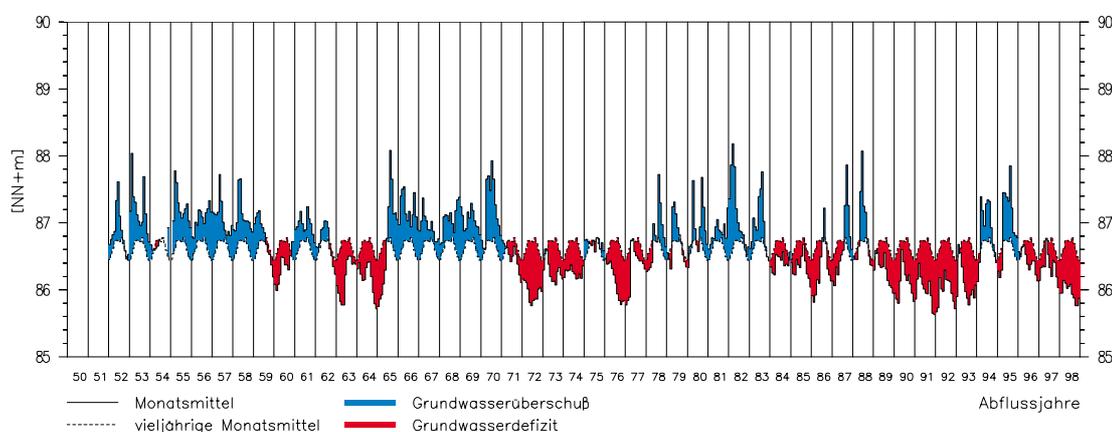
Teilgebiet 10 Östliches Neckarschwemmland

In diesem dem Odenwald westlich vorgelagerten und von der Weschnitz durchquerten Teilgebiet wirkt sich ähnlich wie in Teilgebiet 9 der zeitliche Wechsel der Grundwasserneubildung auf den Grundwasserspiegelgang aus. Daher gilt die vorstehende Beschreibung der aufeinander folgenden Nass- und Trockenperioden hier gleichermaßen (Abb. 4.17). Auffallend ist, dass in diesem Gebiet die überdurchschnittlich hohen Grundwasserstände im Jahr 1988 sogar das Niveau des Hochs im Jahr 1983 übertrafen. 1998 lagen die Grundwasserstände im Bereich des vieljährigen Mittels.

Teilgebiet 11 Hessische Rheinebene

In diesem Teilgebiet ist der Rhein der Hauptvorfluter in den das Grundwasser in der Regel abfließt. In unmittelbarer Nähe des Rheins bestimmen die Rheinwasserstände den Grundwasserspiegel, der mit ebenso kurzfristigen Schwankungen auf die Pegelstände reagiert (Abb. 4.18). Die niedrigen Wasserstände in den Jahren 1990 bis 1993 lagen auf ähnlich tiefen Niveau wie in den Jahren 1976 und 1964. Die hohen Grundwasserstände, die zusammen mit dem Hochwasser in 1970, 1983, 1988 und 1995 entstanden, traten in einer ca. 3-4 km breiten Zone östlich des Rheins auf. Sie entstehen bei hoher Grundwasserneubildung und gleichzeitigem Rückstau des Grundwassers, das wegen zu hohem Rheinwasserstand nicht in den Vorfluter abfließen kann. Auch im Jahr 1998 lagen die Grundwasserstände unterhalb der vieljährigen Mittelwerte.

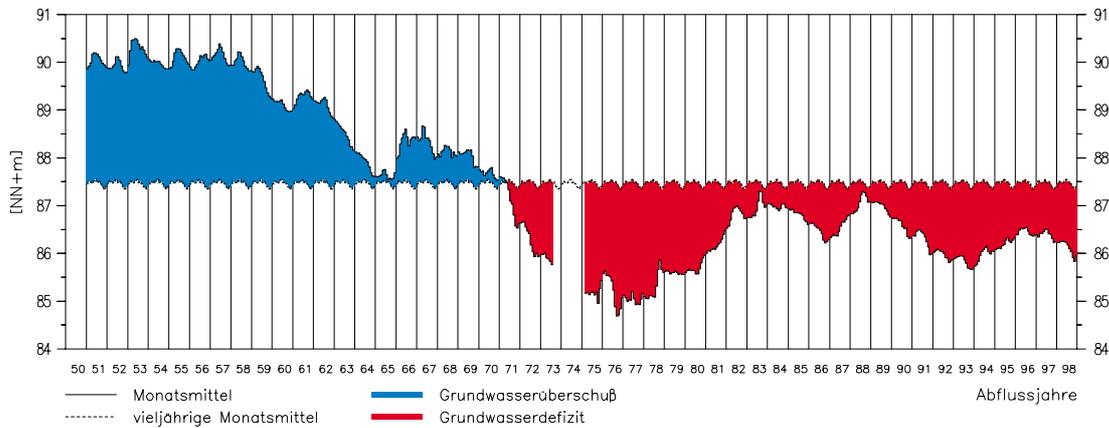
Abb. 4.18: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544003 Hofheim



Teilgebiet 12 Niederterrasse der hessischen Rheinebene

Im Osten des Gebietes sind die Schwankungen der Grundwasserstände relativ gering, da hier versickerndes Wasser der Weschnitz ausgleichend wirkt. Im übrigen ist das Gebiet von großräumigen Grundwasserabsenkungen infolge der Entnahmen im Lorsche Wald und der Brunnen Käfertal beeinflusst. Seit Ende der 70er Jahre hat das Grundwasser ein tieferes, aber stabiles Niveau erreicht. Die besonders niedrigen Grundwasserstände in 1993 lagen nur wenig höher als in 1976. Die Messstelle Bürstadt (Abb. 4.19) zeigt gegenüber 1976 einen um ca. 1 m höheren Wasserstand, was auf die Verlagerung der Entnahmen auf den Mittleren Grundwasserleiter zurückzuführen ist. Nach einer Erholungsphase bis 1997, sank der Grundwasserstand an der Messstelle im Jahr 1998 wieder deutlich ab.

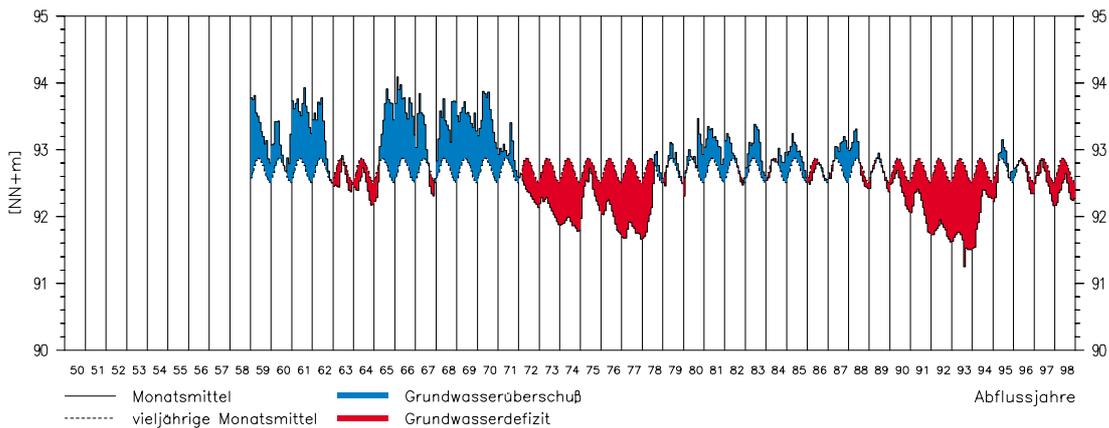
Abb. 4.19: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544026 Bürstadt



Teilgebiet 13 Aue des Altneckars

Die hohe Grundwasserneubildung und die geringen Grundwasserflurabstände bewirken kurzfristige Wasserspiegelschwankungen mit großen Amplituden (Abb. 4.20). Das Absinken des mittleren Grundwasserspiegels um 0,5 bis 1,0 m seit 1970 beruht hauptsächlich auf dem zur Entwässerung angelegten Grabensystem und den Entnahmen. In Trockenperioden sank der Grundwasserspiegel besonders stark, so dass es 1976 und 1993 zu Gebäudeschäden durch Bodenaustrocknung und -setzungen kam. 1997 und 1998 lagen die Grundwasserstände knapp unter den vieljährigen Mittelwerten.

Abb. 4.20: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544023 Heppenheim



Neben der Grundwassergewinnung zur Wasserversorgung haben gezielte wasserbauliche Eingriffe in den letzten zwei Jahrhunderten (Rheinkorrektion TULLA's, Generalkulturplan) und die Intensivierung der räumlichen Nutzung zu Veränderungen des Grundwasserhaushaltes im Hessischen Ried geführt. Das Absinken der Grundwasserstände kann in Trockenjahren kritische Ausmaße annehmen und zu Gebäude- und Waldschäden führen. Daher erfolgt mit

dem 1999 festgesetzten Grundwasser-Bewirtschaftungsplan für das Hessische Ried [1] eine integrierte Grundwasserbewirtschaftung unter besonderer Berücksichtigung bautechnischer (Gebäudesetzungen und Vernässungen), ökologischer (Natur- und Landschaftsschutz, Waldökologie), wirtschaftlicher (Kosten-Nutzen-Analyse) und qualitätsbezogener (Grundwasserbelastungen und -gefährdungen) Gesichtspunkte. Im Ergebnis ist in Teilbereichen die Aufspiegelung der Grundwasseroberfläche um mehrere Meter bis zu definierten Richtwerten beabsichtigt. Diese Richtwerte mittlerer Grundwasserstände lassen klimatisch bedingte Grundwasserspiegelschwankungen in der Größenordnung der vieljährigen natürlichen Grundwasserspiegelschwankungen zu. Wesentliche Steuerungsinstrumente sind die Optimierung der Grundwasseranreicherung durch Infiltration von in Biebesheim aufbereitetem Rheinwasser, die Verdichtung und der Ausbau des regionalen Leitungsverbundes Südhessen, Maßnahmen zur rationellen Wasserverwendung und ein naturräumliches und nutzungsspezifisches Monitoring.

4.2.3 Zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände in den tieferen Grundwasserleitern

Das amtliche Messnetz zur Beobachtung der tieferen Grundwasserleiter wurde erst Anfang der 80er Jahre eingerichtet. Von einigen nicht amtlichen Messstellen (Vorfeldmessstellen der Wasserwerke und Industrie) liegen Aufzeichnungen bis Anfang der 60er Jahre vor. Die meisten Tiefmessstellen erfassen bei einer Ausbautiefe von rd. 80-100 m u. Gel. den Druckwasserspiegel im Mittleren Grundwasserleiter (MGWL). Der MGWL ist durch den Oberen Zwischenhorizont (OZH) hydraulisch wirksam vom Oberen Grundwasserleiter getrennt. Der Untere Grundwasserleiter (UGWL), der unterhalb des Unteren Zwischenhorizontes (UZH) beginnt, wird mit nur wenigen Messstellen beobachtet. Diese sind bis zu 200 m u. Gel. verfiltert. Die Druckwasserspiegel in den tieferen Grundwasserleitern werden durch die Speicherfüllung und -entleerung im Oberen Grundwasserleiter (OGWL) infolge der hydrologischen Einflüsse (Neubildung aus Niederschlag, Gewässerinfiltration) sowie maßgebend durch die Grundwasserentnahmen der Trinkwasser- und Industriebrunnen beeinflusst.

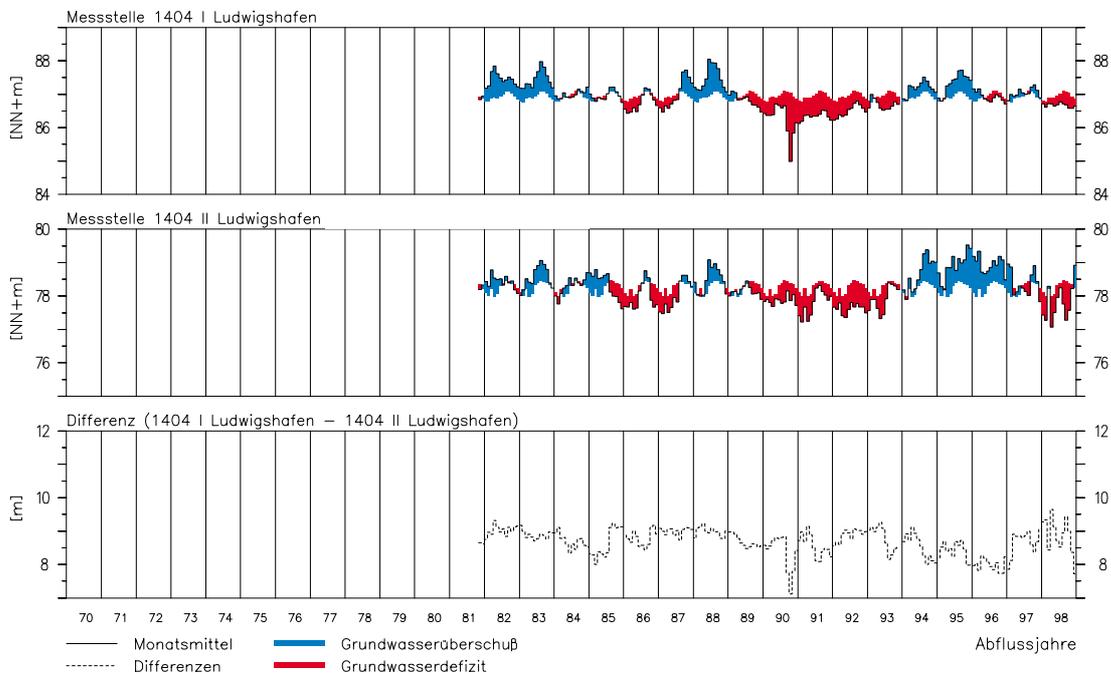
Infolge der direkten Druckübertragung von Rheinwasserspiegelschwankungen über den OZH bzw. Entnahmeeinflüssen, sind die Grundwasserstandsschwankungen in den gespannten Grundwasserleitern innerhalb eines Betrachtungsjahres erheblich größer als die Schwankungen des freien Wasserspiegels im Oberen Grundwasserleiter. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes sind die Druckwasserspiegel des MGWL durch den ausgeprägten, großräumigen Absenkungstrichter im Stadtbereich Ludwigshafen-Mannheim um mehrere Meter gegenüber dem freien Grundwasserspiegel im OGWL abgesenkt worden. Die Druckabsenkungen wurden bereits im Bericht der Stufe II (1987) ausführlich beschrieben und in Gleichenplänen dargestellt.

Die nachfolgenden Ganglinienbetrachtungen zeigen die Entwicklung der Druckwasserspiegel im MGWL von Anfang der 80er Jahre bis 1998. Fortschreitende Veränderungen werden erkennbar durch die Darstellung von Differenzen zu den Grundwasserständen im OGWL.

Stadtgebiet von Ludwigshafen

Linksrheinisch zeigt im zentralen Bereich des Absenkungstrichters die Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1404 I, II Ludwigshafen-Edigheim (Abb. 4.21) von 1982 bis Mitte 1993 einen in sich horizontalen Verlauf. Der Druckwasserspiegel liegt um rd. 8,0 bis 9,0 m tiefer als der freie Grundwasserspiegel im OGWL. Ab Mitte 1993 bis zum Ende des Abflussjahres 1996 erholte sich der Druckwasserspiegel um rd. 1,0 m, was durch die Verringerung/Verlagerung der BASF-Förderung bedingt ist. In den Jahren 1997 und 1998 liegen die Differenzen wieder bei rd. 9,0 m.

Abb. 4.21: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1404 I, II Ludwigshafen-Edigheim



Einen positiven Trend zeigt die Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1381 I, II Ludwigshafen-Oppau (Abb. 4.22). Die Differenzganglinie lag von 1983 bis 1993 rd. 6,5 m tiefer als der freie Wasserspiegel im OGWL. Durch die großräumige Entnahmereduzierung seit 1993 stieg der Druckwasserspiegel; die Differenzganglinie lag Ende 1998 bei rd. 5,5 m.

Im Einzugsgebiet des Wasserwerks Frankenthal zeigt die Differenzganglinie der Doppelmessstelle 1419 I, II (Abb. 4.23) einen nahezu horizontalen Verlauf von 1982 bis 1996. Der Druckwasserspiegel liegt rd. 2,5 m tiefer als der freie Grundwasserspiegel. 1997 und 1998 wurden die Grundwasserstände nur unregelmäßig gemessen.

Abb. 4.22: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1381 I, II Ludwigshafen-Oppau

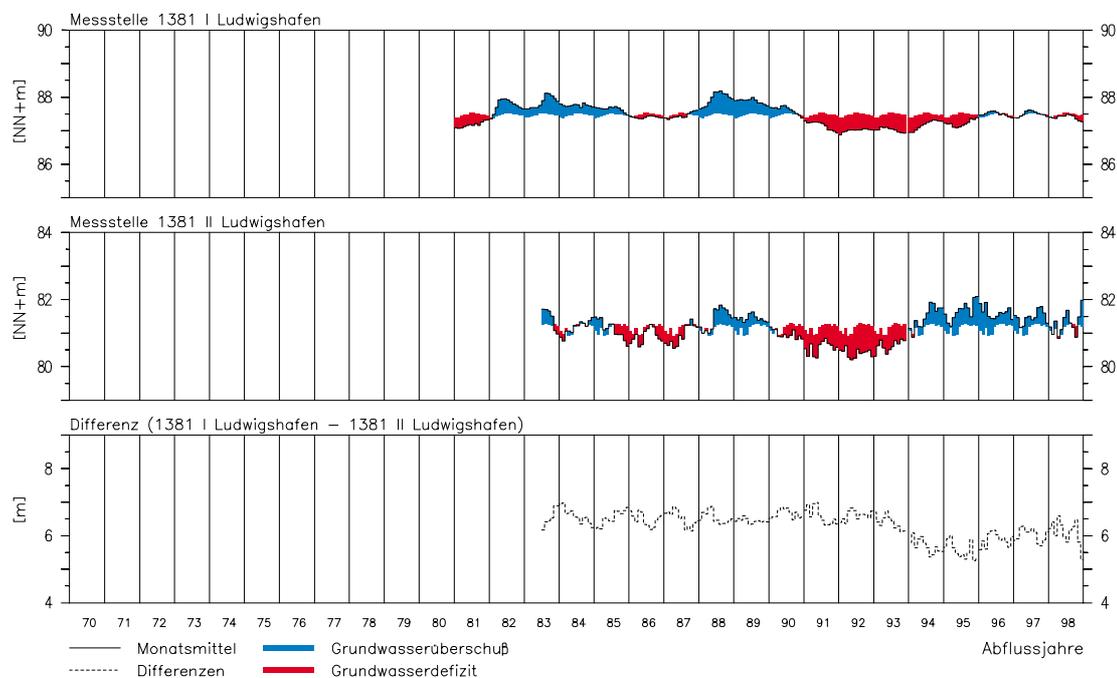
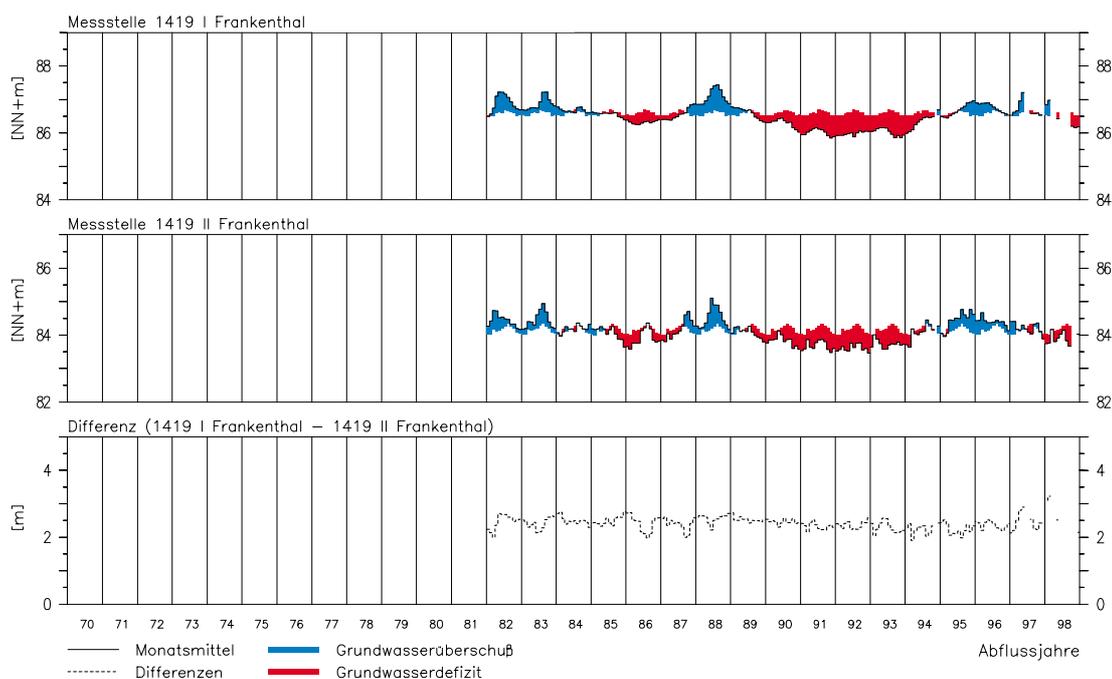
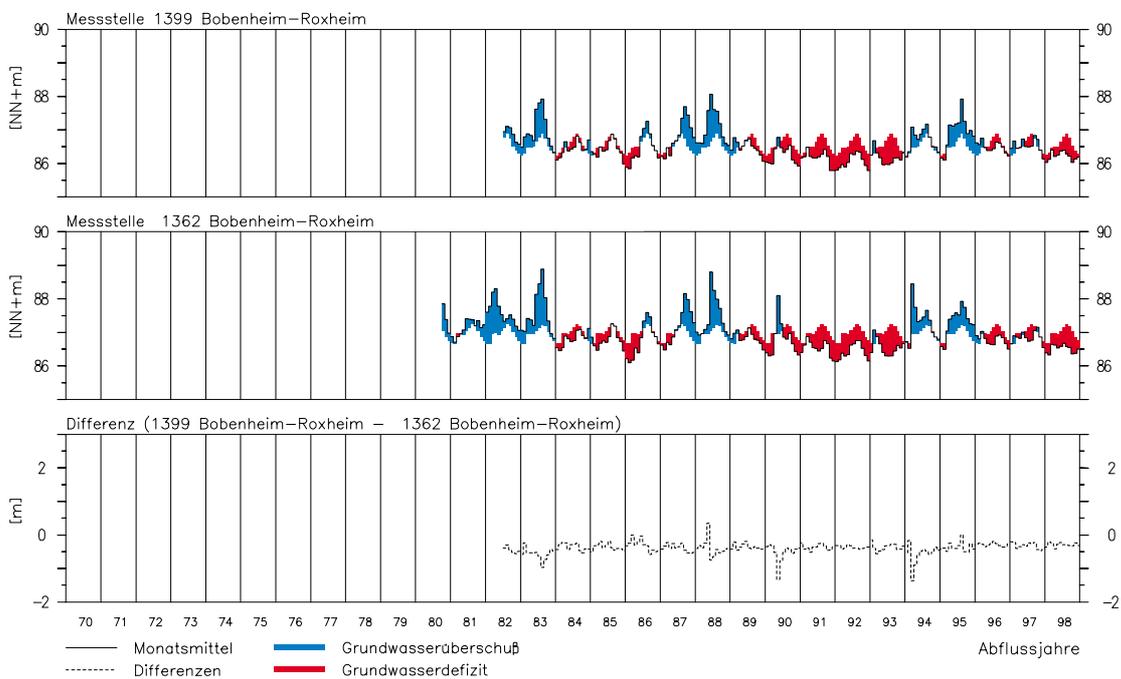


Abb. 4.23: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1419 I, II Frankenthal



Im nördlichen Randbereich des großräumigen Absenkungstrichters befinden sich die Tiefmessstelle 1399 und die Flachmessstelle 1362 Bobenheim-Roxheim (Abb. 4.24). Die Differenzganglinie der beiden Messstellen zeigt über den 17jährigen Beobachtungszeitraum einen horizontalen Verlauf. Die Grundwasserentnahmen im Stadtgebiet wirken sich nur noch gering auf den Druckwasserspiegel aus, er steht an der Messstelle Nr. 1399 rd. 0,2 m unter dem freien Grundwasserspiegel. Auch in diesem Raum findet noch eine Versickerung von Grundwasser aus dem OGWL in den MGWL statt.

Abb. 4.24: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Messstellen Nr. 1399 und 1362 Bobenheim-Roxheim



Westlich der Frankenthaler Terrasse

Im westlichen Bereich des Untersuchungsraumes steht die Doppelmessstelle Nr. 1435 I, II Erpolzheim (Abb. 4.25). Die Differenzganglinie zeigt einen durch Entnahmen unbeeinflussten Verlauf. Der Druckwasserspiegel liegt rd. 0,3 m über dem freien Grundwasserspiegel.

Nonnenwald - Speyerbach

Im Stadtwald Speyer befindet sich die Doppelmessstelle 1353 I, II (Abb. 4.26). Seit Anfang November 1992 führen die Stadtwerke Speyer einen Langzeitpumpversuch mit einer Förderung von rd. 1,0 Mio. m³/a an einem neuen Tiefbrunnen durch. Die Auswirkungen des Pumpversuches lassen sich am Druckwasserspiegel der Messstelle 1353 II und an der Differenzganglinie erkennen. Die Potenzialdifferenz stieg von rd. 3,0 m auf rd. 5,0 m an.

Abb. 4.25: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1435 I, II Erpolzheim

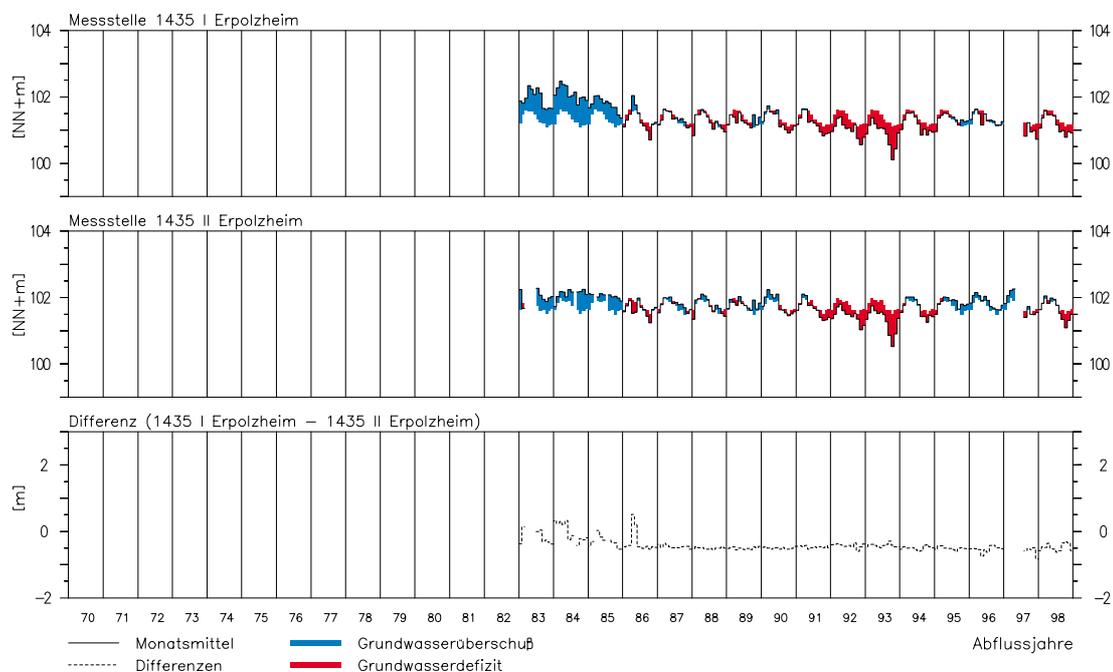
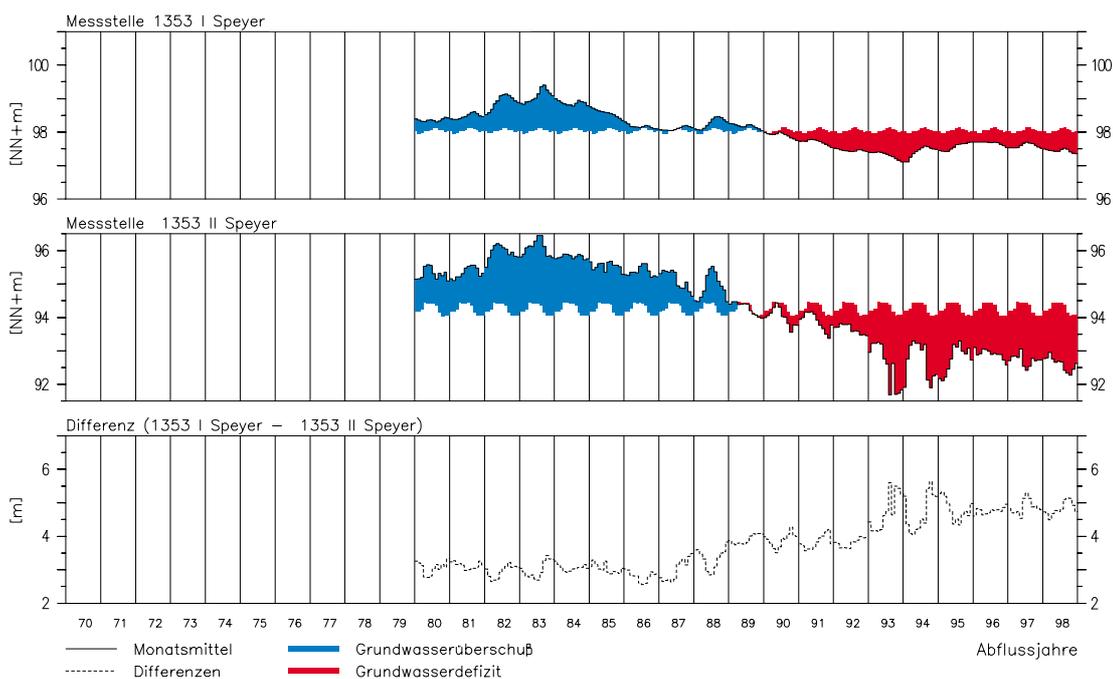


Abb. 4.26: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle Nr. 1353 I, II Speyer

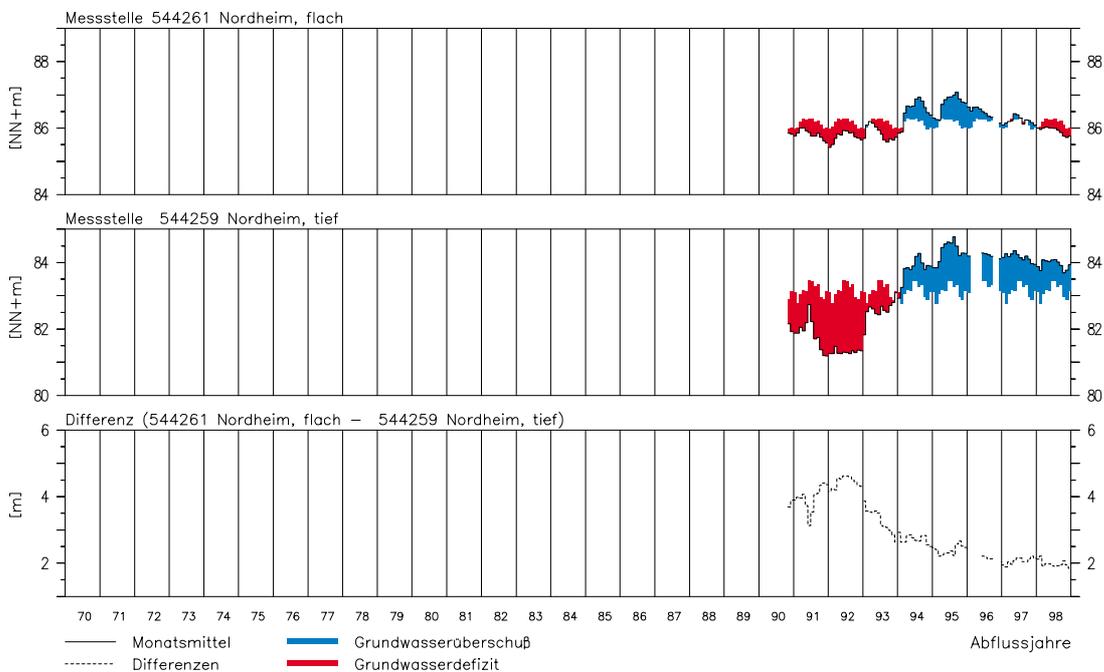


Zusammenfassend ist für den linksrheinischen Untersuchungsraum festzustellen, dass sich der Druckwasserspiegel, im großräumigen Absenkungstrichter Ludwigshafen-Mannheim, in den vergangenen rd. 15 Jahren stabilisiert hat bzw. durch Entnahmereduzierung oder Entnahmeverlagerung in tiefere Grundwasserstockwerke bereichsweise um 1 bis 2 m angestiegen ist. Die Beobachtung der tieferen Grundwasserleiter ist aufgrund von neuen Tiefbrunnengenerationen zu intensivieren. Hierzu sind von den Wasserversorgungsunternehmen und der Industrie geeignete Vorfeldmessstellen einzurichten und kontinuierlich zu beobachten.

Hessische Rheinebene

In diesem Teilgebiet keilt der Obere Zwischenhorizont (OZH) aus oder er ist nur noch so gering-mächtig und sandig ausgebildet, dass er keine hydraulisch Trennung zwischen den Grundwasserleitern bildet und damit der Druckwasserspiegel entfällt. Es gibt hier Druckunterschiede zwischen dem tertiären Grundwasserleiter und dem nach Westen hin ausdünnenden Quartär, die in einer Dreifachmessstelle (Abb. 4.27) in Nordheim nachgewiesen sind. Die Grundwasserentnahmen in Worms wirken sich im tiefen GWL großräumig aus. Zu Beginn der Beobachtung im Jahr 1990 lag die Differenz bei 4 m, die sich jedoch bis 1998 auf 2 m verringerte.

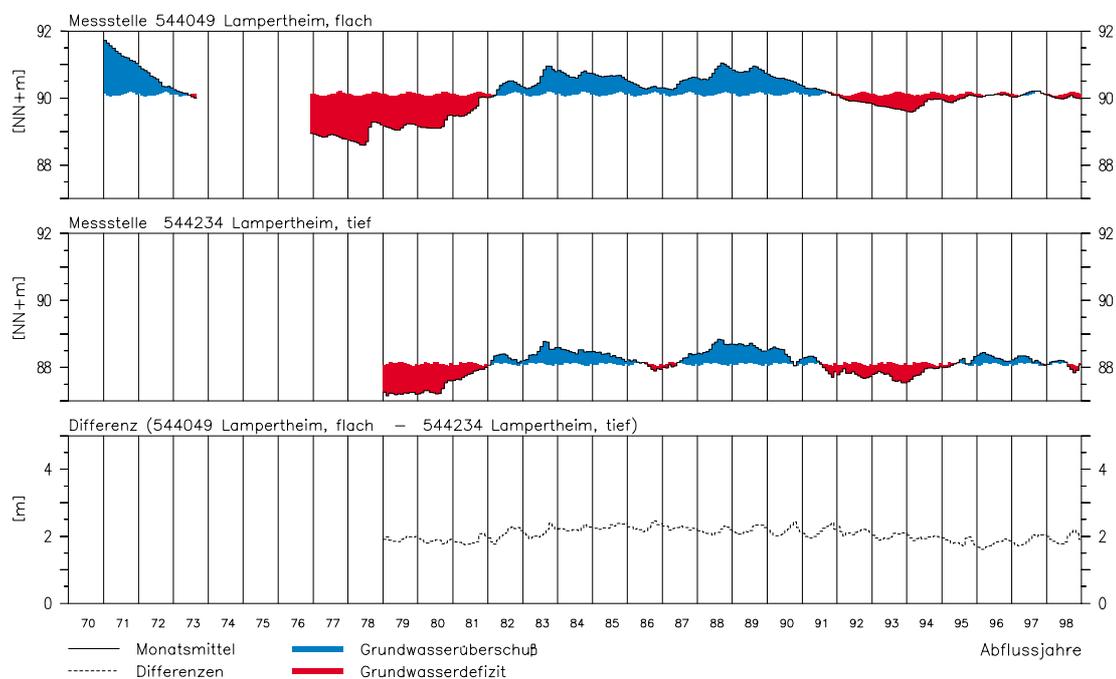
Abb. 4.27: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544261 flach und 544259 tief Nordheim



Niederterrasse der hessischen Rheinebene

Der Druckunterschied zwischen dem Oberen und Mittleren Grundwasser beträgt seit Beginn der Beobachtung im Jahr 1978 ca. 2,0 m. Kleinere Abweichungen der Differenzen in den Ganglinien weisen auf Schwankungen der Entnahmen aus den Tiefbrunnen Bürstadt, Hemsbach und Käfertal hin; der langfristige Verlauf der Wasserstände ist fast parallel. Typisch sind die Ganglinien der Doppelmessstelle Lampertheim (Abb. 4.28), die von allen Tiefbrunnen beeinflusst wird.

Abb. 4.28: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544049 flach und -234 tief Lampertheim



Aue des Altneckars

Der Druckunterschied zwischen Oberem und Mittlerem Grundwasser beträgt seit Beginn der Beobachtung in 1981 ca. 2,5 m. Die Entnahmen im MGWL haben sich in dem Zeitraum wenig verändert, so dass der Verlauf der Wasserstände fast parallel ist (Abb. 4.29).

Rechtsrheinische Rheinniederung südlich Mannheim

Die Schwankungen der Druckspiegel in den tieferen Grundwasserleitern werden über den OZH durch die weitgehend rheinbeeinflussten Grundwasserspiegeländerungen im OGWL sowie durch die Grundwasserentnahmen bestimmt. Die Ganglinie der flachen und der tiefen

Abb. 4.29: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 544012 flach und -256 tief Heppenheim

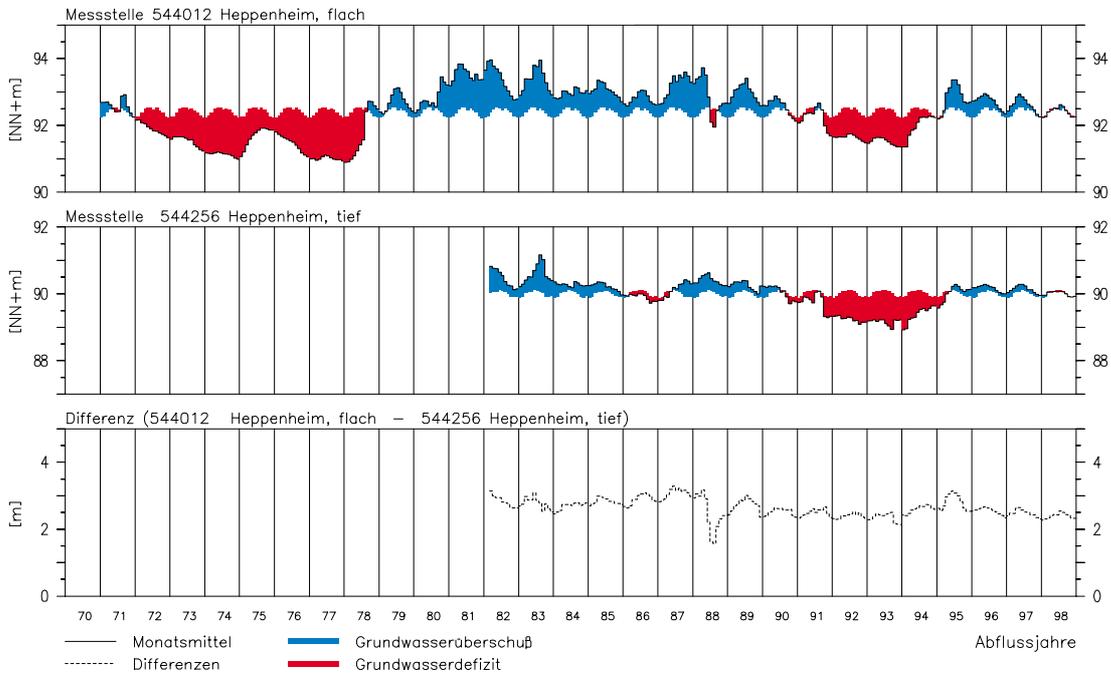
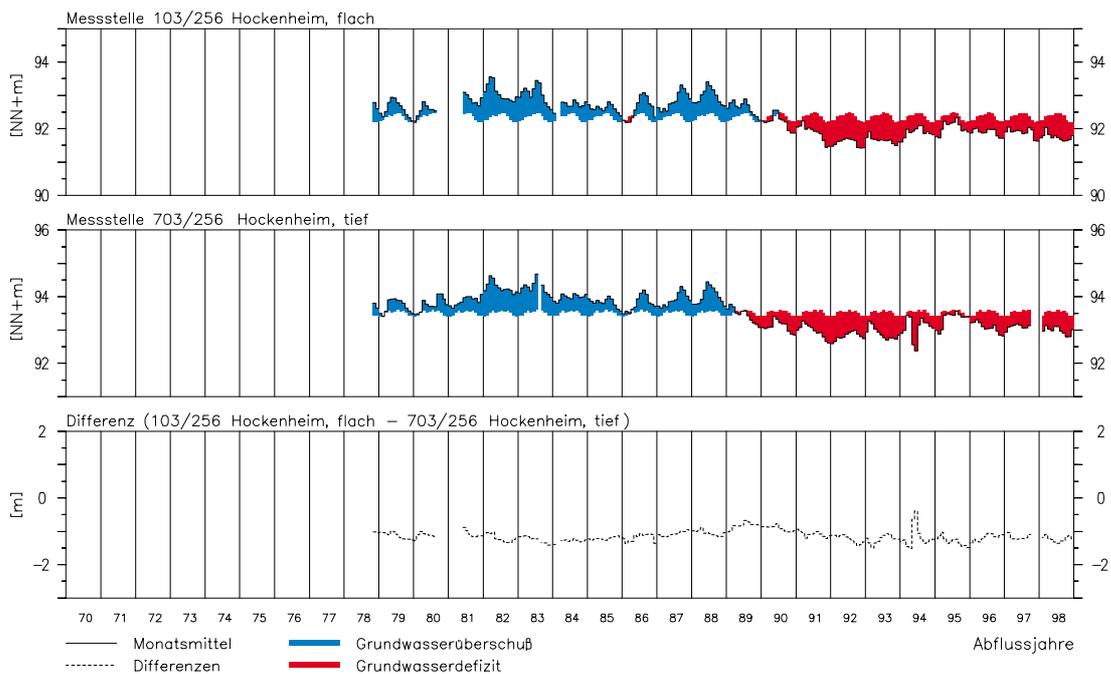


Abb. 4.30: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 103/256 flach und 703/256 tief Hockenheim

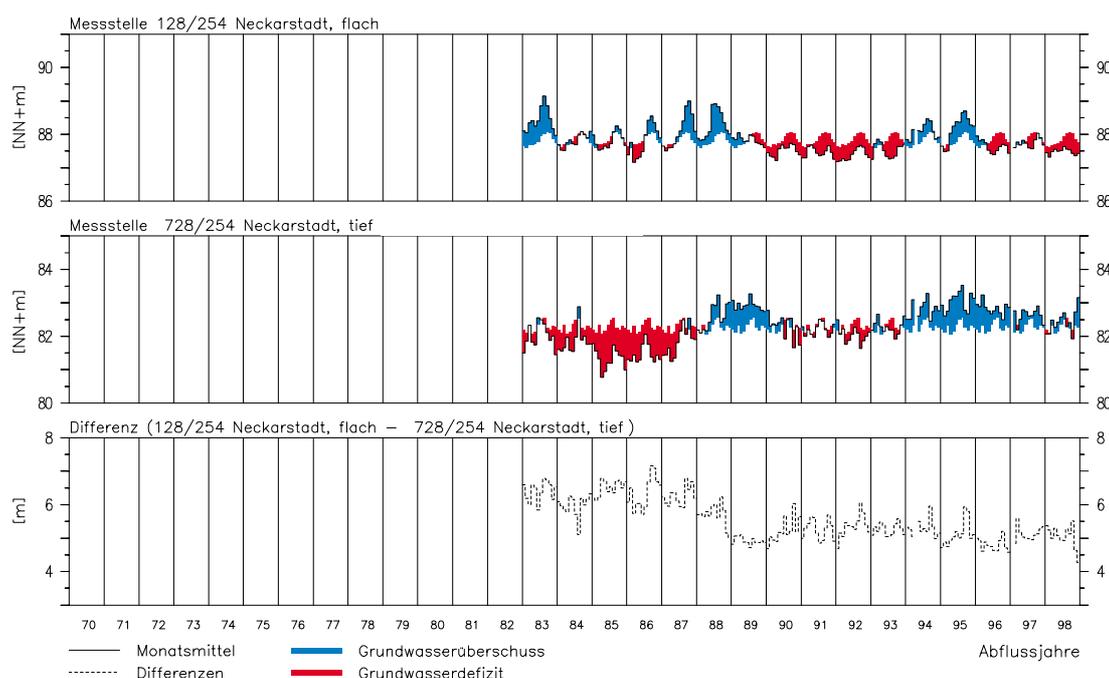


Messstelle Hockenheim (Abb. 4.30) zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei der Gang an der tieferen Messstelle entnahme- und spannungsbedingt unruhiger ist. In diesem Bereich sind noch die für die Rheinniederung typischen Druckverhältnisse vorherrschend, d.h. der Druck im MGWL liegt höher als der Grundwasserspiegel im OGWL (rd. 1,5 m an der Doppelmessstelle 103/256-703/256). Das von Osten her in den tieferen Grundwasserleitern dem Grabenzentrum zuströmende Grundwasser findet hier im OGWL bzw. den oberirdischen Gewässern der Rheinniederung seine Vorflut. Im zeitlichen Verlauf kann ähnlich wie im OGWL auch, ausgehend von hohen Potenzialen im Jahr 1988 ein lang anhaltendes Absinken bis zum Ende des Abflussjahres 1993 festgestellt werden.

Großraum Mannheim

Auch hier ist der Einfluss des Rheinwasserstands auf die Druckentwicklung in den tieferen Grundwasserleitern (GWL) deutlich sichtbar (Abb. 4.31). Diese rheinwasserstandsabhängigen Schwankungen werden deutlich durch entnahmebedingte Schwankungen überlagert. Die in der Vergangenheit und auch heute noch umfangreichen Nutzungen in den tieferen GWL im rheinnahen linksrheinischen Bereich als auch im Großraum Mannheim selbst, haben den Druck in den tieferen Grundwasserleitern gegenüber dem Oberen Grundwasserleiter deutlich abgesenkt. In diesem Bereich (Abb. 4.31) beträgt die Druckdifferenz rd. 5 bis 7 Meter, was zur Folge hat, dass hier dem Mittleren Grundwasserleiter aus dem Oberen Grundwasserleiter Grundwasser zufließt.

Abb. 4.31: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 128/254 flach und 728/254 tief Neckarstadt-Herzogenriedpark

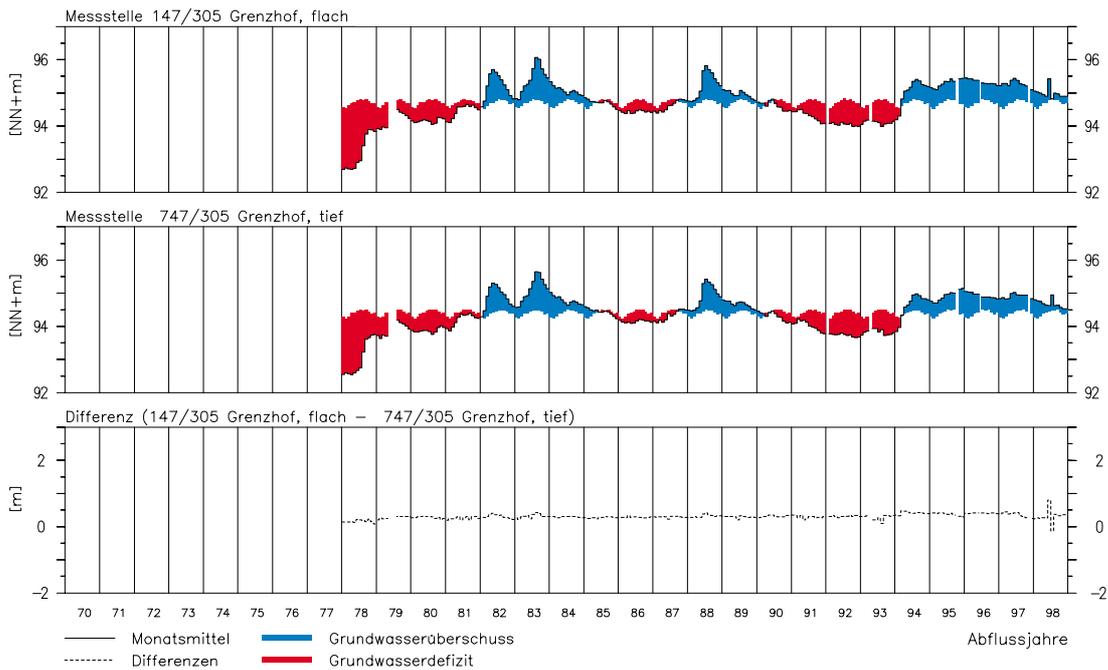


Niederterrasse südlich des Neckars

Die Druckschwankungen werden in diesem Teil des Untersuchungsgebiets nicht mehr durch Wasserstandsschwankungen des Rheins beeinflusst. Hier bestimmen die Neubildungsbedingten Änderungen im OGWL den vieljährigen und jährlichen Verlauf und die Grundwasserentnahmen die kurzfristigen Änderungen des Potentials. Die Grundwasseroberfläche liegt in weiten Bereichen über dem Druckniveau des MGWL, d.h. dem MGWL fließt Grundwasser aus dem OGWL zu, was hier allerdings den natürlichen Verhältnissen entspricht.

Im Bereich der Doppelmessstelle 147/305-747/305 (Abb. 4.32) beträgt die Druckdifferenz rd. 0,5 Meter. Im zeitlichen Verlauf ist auch hier, ausgehend vom hohen Niveau im Jahr 1988, ein lang anhaltendes Absinken um rd. 2,0 Meter bis Ende 1993 zu beobachten. Im Verlauf des Jahres 1994 stiegen die Potentiale wieder um rd. 1,0 Meter an, um anschließend für längere Zeit in etwa auf diesem Niveau zu bleiben.

Abb. 4.32: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 147/305 flach und 747/305 tief Heidelberg-Grenzhof

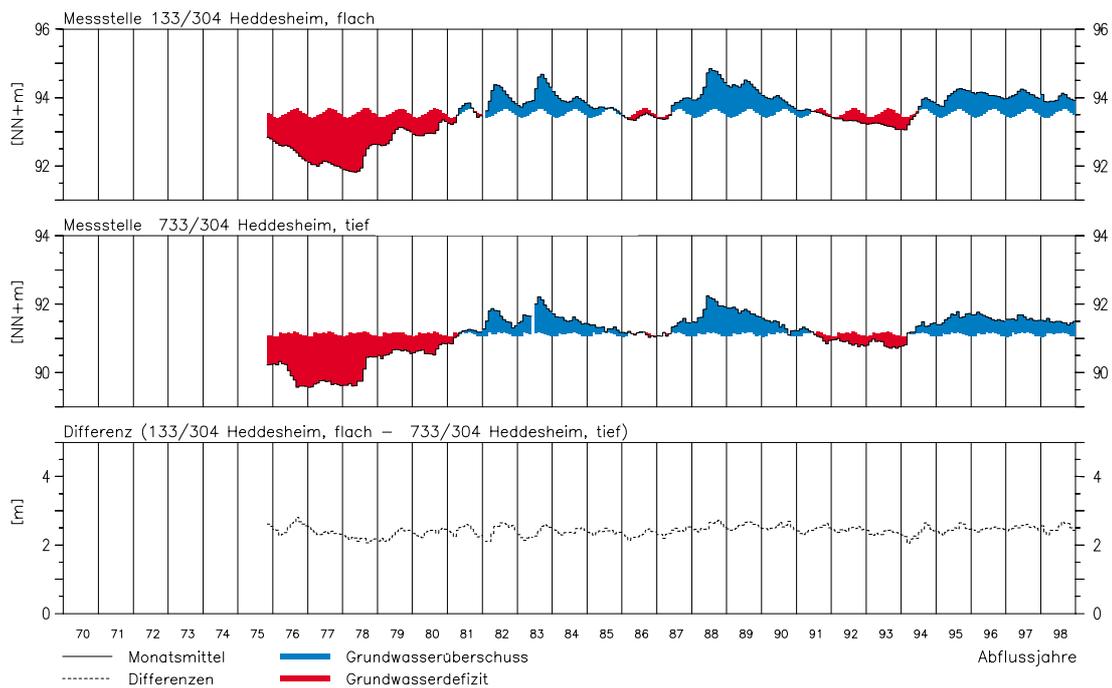


Östliches Neckarschwemmland

Auch in diesem Teil des Untersuchungsgebietes werden die Druckschwankungen im MGWL nicht mehr durch die Änderungen des Rheinwasserstandes beeinflusst. Die Neubildungsbedingten Änderungen im OGWL bestimmen die vieljährige und jährliche Druckentwicklung und die Grundwasserentnahmen die kurzfristigen Änderungen des Potentials. Die Grundwasseroberfläche liegt in weiten Bereichen deutlich über dem Druckniveau des MGWL, d.h., dem MGWL fließt Grundwasser aus dem OGWL zu. Allerdings wäre dies – in abgeschwächter Form – hier auch bei natürlichen Verhältnissen der Fall. Im Bereich der Doppelmessstelle

133/304-733/304 (Abb. 4.33) beträgt die Druckdifferenz rd. 2,5 Meter. Im zeitlichen Verlauf der Ganglinien ist auch hier, ausgehend vom hohen Niveau im Jahr 1988, ein lang anhaltendes Absinken um rd. 2,0 Meter bis Ende 1993 zu beobachten. Im Verlauf der Jahre 1994 und 1995 stiegen die Potenziale wieder um rd. 1 Meter an.

Abb. 4.33: Grundwasserstandsganglinien und Differenzganglinie der Doppelmessstelle 133/304 flach und 733/304 tief Heddesheim



4.2.4 Grundwasseroberfläche und Druckverteilung

4.2.4.1 Allgemeines

Zur Auswertung der räumlichen Zusammenhänge zwischen dem Grundwasser und den darauf Einfluss nehmenden Bedingungen werden die vorliegenden Messdaten in Form von Grundwasserhöhengleichenkarten (Karten 7 und 10a) und Grundwasserflurabstandskarten (Karten 8 und 10b) dargestellt und ausgewertet. Mit Hilfe der Karten lassen sich die Grundwasserströmungsverhältnisse erkennen, die Fließrichtung senkrecht zu den Höhengleichen ermitteln und das Gefälle aus den Abständen der Höhengleichen bestimmen. Das Grundwasser im OGWL hat in der Regel eine freie Oberfläche. Das tiefere Grundwasser ist weitläufig durch Tonschichten des OZH vom Oberen Grundwasser hydraulisch getrennt und ist gespannt. Die Höhengleichen des Mittleren/Tieferen Grundwassers (Karten 9 und 10d) spiegeln die Druckverteilung im tieferen Grundwasser wieder. Im Rahmen der Bearbeitung wurden die Karten der Grundwasserhöhengleichen für eine mittlere hydrologische Situation

(repräsentativer Stichtag im Herbst 1990) und eine Niedrigwassersituation (Oktober 1993) ausgewertet.

4.2.4.2 Oberes Grundwasser

Die Grundwasserhöhengleichen zeigen die Kontur der Grundwasseroberfläche im Oberen Grundwasserleiter (OGWL) bei mittleren Verhältnissen am 1. Oktober 1990 (Karte 7) und bei einer Niedrigwassersituation am 4. Oktober 1993 (Karte 10a). Die Grundwasseroberfläche für den 1.10.1990 hat sich gegenüber der Grundwasseroberfläche vom Stichtag 3. Oktober 1983 (Bericht der Stufe II, 1987) nur wenig verändert. Hierdurch dokumentiert sich, dass die Veränderungen in der Nutzungssituation (Kap. 4.3.6) sich nur geringfügig auf die großräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse im OGWL auswirken.

Im linksrheinischen Teil des Untersuchungsgebiets fließt das Grundwasser vom Pfälzerwald in östlicher bis nordöstlicher Richtung dem Rhein als Hauptvorfluter zu. In der Rheinniederung schwenken die Grundwassergleichen nach Norden und geben der Grundwasserfließrichtung einen rheinparallelen Verlauf. Auffällig ist das relativ gleichmäßige Grundwassergefälle von rd. 1,5 ‰ in den Schwemmfächern der oberirdischen Gewässer bis zur westlichen Grenze der Frankenthaler Terrasse. Auf der Frankenthaler Terrasse bis zum Hochgestade der Rheinniederung wird das Grundwassergefälle flacher. In der Rheinniederung fließt das oberflächennahe Grundwasser nur noch mit einem Gefälle von <0,9 ‰ rheinparallel ab.

Im Stadtgebiet von Ludwigshafen haben die Grundwasserentnahmen in den tieferen Grundwasserleitern, in Verbindung mit bereichsweise geringer hydraulischer Sperrfunktion des schluffig-tonigen Oberen Zwischenhorizontes (sog. „Fenster“), im oberflächennahen Grundwasser eine Depression verursacht. Markant ist der Absenkungsbereich im Maudacher Bruch. Je nach hydrologischem Zustand (Nass- oder Trockenperiode) infiltriert der Rhein in das oberflächennahe Grundwasser und füllt die Depression auf.

Im rechtsrheinischen Teil des Untersuchungsraumes fließt das Grundwasser südlich des Neckars vom Gebirgsrand her in nordwestlicher Richtung mit einem Gefälle von rd. 1 bis 2 ‰ auf die Rheinniederung zu. Größere Grundwasserförderungen ziehen die Höhengleichen nach oberstrom, wodurch sich das regionale Grundwassergefälle vermindert. Lokal betrachtet sind hier Absenktrichter vorhanden, die in der vorliegenden Konturdarstellung mit einer Höhendifferenz von 1,0 Meter nicht zum Ausdruck kommen. Im Bereich der Rheinniederung ändern sich die Gefälleverhältnisse grundlegend und sie hängen stark von den örtlich vorhandenen oberirdischen Gewässern ab. Bereichsweise sind hier Grundwassergefälle von lediglich 0,2 ‰ vorhanden.

Nördlich des Neckars fließt das Grundwasser ebenfalls von Ost nach West zum Rhein hin. Die Fließrichtung wird am Verlauf der Weschnitz abgelenkt und zwar bis Lorsch nach Norden hin infolge der Versickerung aus dem Gewässer in das Grundwasser. Ab Lorsch verläuft die Weschnitz nach Westen und lenkt das Grundwasser zum Gewässer hin ab, da dieses zu meist Vorflutwirkung besitzt. Im Bereich der Brunnen Käfertal, Bürstadt und Südgalerie des Wasserwerks Ried Ost wird die Fließrichtung zu diesen Anlagen hin abgelenkt.

Die Differenz der Grundwasserstände zwischen Oktober 1990 und Oktober 1993 (Karte 10c) ist linksrheinisch und in der Nähe der Nebengewässer sowie auf der Frankenthaler Terrasse gering. In der Rheinniederung lagen im Oktober 1993 die Grundwasserstände infolge höherer

Rheinwasserstände weithin höher als im Oktober 1990. Die Grundwasserstandsdifferenz zwischen dem Grabenrand und dem Rhein war demnach 1993 um rd. 2 Meter geringer als 1990. Rechts des Rheins reagierte das Grundwasser im Niederterrassenbereich südlich und nördlich des Neckars auf die geringen Niederschläge bis 1993 mit einem weiträumigen Absinken von 0,5 bis 2,0 m. In Hessen wurden im Oktober 1993 extrem niedrige Grundwasserstände mit Werten von 1,0 bis 2,0 m unter den Oktoberwerten von 1990 beobachtet.

4.2.4.3 Flurabstände des Oberen Grundwassers

Für die Grundwasserflurabstände (Karten 8 und 10b) ist die Geländemorphologie maßgebend, da die Grundwasseroberfläche relativ gleichmäßig mit geringem Gefälle zum Rhein hin fällt. Die Konturen der Terrassen, Hochgestade und der Ost-West verlaufenden Riedel im Westen des Untersuchungsraumes prägen deutlich die Flurabstände. In der Karte 8 sind die Flurabstände des Grundwassers am 1.10.1990, also für etwa mittlere Verhältnisse dargestellt. Die Karte 10b zeigt die Grundwasserflurabstände am 4.10.1993, als im Niederterrassenbereich sehr niedrige Grundwasserstände vorherrschten. Im Vergleich der beiden Karten sieht man, dass die Gebiete mit geringen Flurabständen vorwiegend an die Gewässer gebunden sind und mit geringer Grundwasserstandsabsenkung auf die Trockenjahre 1992/93 reagierten. Östlich des Rheins, wo die Flurabstände im wesentlichen von der örtlichen Grundwasserneubildung abhängen, vergrößerten sich die Bereiche mit großen Flurabständen von Oktober 1990 bis Oktober 1993 deutlich.

4.2.4.4 Mittleres Grundwasser

Die Druckverteilung des Grundwassers im tieferen Grundwasser, insbesondere im MGWL, wird in den Grundwasserhöhengleichenkarten vom Oktober 1990 (Karte 9) und Oktober 1993 (Karte 10d) dargestellt. Die Druckhöhe nimmt sowohl von Westen wie auch von Osten her zum Rhein hin ab, dementsprechend fließt das Grundwasser in den tieferen Grundwasserleitern von den Grabenrändern der Rheinniederung bzw. dem großräumigen Absenke-trichter im Raum Ludwigshafen-Mannheim zu. In Rheinnähe konzentrieren sich die niedrigsten Druckwasserspiegel bzw. Grundwasserhöhengleichen linksrheinisch entlang des Rheins im Umfeld der BASF Brunnengalerie und in den Bereichen der Trinkwassergewinnungsanlagen mit regionalen Absenkungstrichtern wie in Maudach, Frankenthal, Schifferstadt, Speyerer Stadtwald und Ordenswald. Rechtsrheinisch findet man die Druckabsenkungsbereiche bei Hemsbach, Käfertal, Schwetzingen Hardt u.a. Die natürliche Druckverteilung ist durch die großflächige Auswirkung der Grundwasserentnahmen weithin beeinflusst. Diese Situation ist durch die Karte 10d auch für das Jahr 1993 dokumentiert. In der Rheinniederung des Großraums Ludwigshafen-Mannheim haben sich die ursprünglichen Druckverhältnisse seit vielen Jahren umgekehrt. Hier infiltriert Grundwasser aus dem OGWL durch den OZH in den MGWL, wohingegen weiter südlich im Bereich der Rheinniederung das von den Grabenrändern her im MGWL strömende Grundwasser aufgrund seiner Druckpotenziale über den OZH den OGWL auffüllt.

Der Druckunterschied zwischen dem Druckwasserspiegel im Mittleren bzw. tieferen Grundwasser und der freien Grundwasseroberfläche des Oberen Grundwassers (vgl. Karten 9 und 10d) ist im Stadtbereich Ludwigshafen-Mannheim und in den Trinkwassergewinnungsgebieten der Brunnen Hemsbach, Neustadt und Speyerer Stadtwald besonders groß. Die Entnahmen aus der Tiefe verursachten im Stadtgebiet von Ludwigshafen über die zurückliegenden Jahrzehnte eine deutliche Absenkung der freien Oberfläche des Oberen Grund-

wassers (Frankenthaler Depression). In den übrigen Trinkwassergewinnungsgebieten sind jedoch keine gravierenden lokalen Absenkungen der Grundwasseroberfläche festzustellen, sondern die Tiefenentnahmen wirken sich großflächig mit geringen Absenkungsbeträgen auf das Obere Grundwasser aus. Rechtsrheinisch in den Gewinnungsgebieten von Käfertal und Schwetzingen Hardt sind die Differenzbeträge trotz relativ großer Entnahmen aus der Tiefe gering, da die Entnahmen aus mehreren Stockwerken zugleich erfolgen und sich damit die Absenkungen auf die Grundwasseroberfläche im Oberen Grundwasser und die Druckfläche im tieferen Grundwasser gedämpft auswirken.

Im Teilgebiet 11 (hessische Rheinebene) ist keine Druckdifferenz zwischen dem OGWL und MGWL wegen des fehlenden Oberen Zwischenhorizontes (OZH) vorhanden. Im nordwestlichen Randbereich des Untersuchungsraumes gibt es aber auf hessischer Seite im 3. Grundwasserleiter eine Druckdifferenz zwischen dem OGWL und dem UGWL, die zum Absenkungstrichter der Tiefbrunnen nördlich von Worms zunimmt.

4.3 Komponenten der Grundwasserbilanz

4.3.1 Allgemeines

Die Grundwasserbilanz für ein definiertes Untersuchungsgebiet setzt sich aus den Zuflussgrößen

- Grundwasserneubildung aus Niederschlag
- unterirdische Randzuströme
- Infiltration aus oberirdischen Gewässern
- künstliche Grundwasseranreicherungen
- Speicherentleerung

und den Abflussgrößen

- Grundwasserzehrung durch Verdunstung
- unterirdische Randabströme
- Drainage durch oberirdische Gewässer
- Grundwasserentnahmen
- Speicherfüllung

zusammen.

Bei einer vieljährigen, d.h. stationären (Kap. 7; Mathematisches Grundwassermodell) Betrachtung sind die Summen der Zufluss- und Abflussgrößen gleich groß, was gleichbedeutend mit einer Stagnation (Beharrung) des Grundwasserspiegels ist. Bei dieser Betrachtungsweise ist demzufolge die Speicherfüllung bzw. -entleerung gleich Null.

Bei einer zeitlich veränderlichen, d.h. instationären Betrachtung ist im allgemeinen eine Speicherfüllung bzw. -entleerung vorhanden, was gleichbedeutend mit einer Veränderung des Grundwasserspiegels ist. In der Bilanzrechnung geht der Speicheranteil entsprechend vorzeichenbehaftet als Speicherfüllung auf der Abflussseite bzw. als Speicherentleerung auf der Zuflussseite ein, wodurch für jeden betrachteten Zeitabschnitt wiederum eine ausgeglichene Wasserbilanz zustande kommt. Bei der Bilanzrechnung in einem mehrstöckigen Grundwasserleitersystem ist bei der Betrachtung eines einzelnen Grundwasserleiters zusätzlich noch der vertikale Wassermengenaustausch zwischen den Stockwerken auf der Zu- und Abflussseite zu berücksichtigen. Eine detaillierte Wasserbilanz im Hinblick auf sämtliche hier geschilderten Teilaspekte ist in Kapitel 7 – Mathematisches Grundwassermodell – enthalten.

4.3.2 Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Grundwasserneubildung ist gemäß DIN 4049 die Zusickerung von Wasser in den gesättigten Bereich eines Grundwasserleiters. Im allgemeinen Fall handelt es sich um Niederschlagswasser, das nach entsprechenden Verdunstungsverlusten in den Boden und durch die mehr oder weniger mächtige ungesättigte Zone des Grundwasserleiters sickert. Andere Verluste wie insbesondere Abfluss an der Geländeoberfläche, speziell bei hoher Niederschlagsintensität oder der sog. Zwischenabfluss, spielen im untersuchten Gebiet wegen der im allgemeinen mittleren bis guten Infiltrationseigenschaften der Deckschichten und des meist geringen Reliefs keine besondere Rolle und werden daher nicht berücksichtigt. Die unterschiedlich lange Durchsickerungszeit bzw. Verweildauer in der ungesättigten Zone des Grundwasserleiters kann in den Betrachtungen ebenfalls vernachlässigt werden, da nur jährliche und vieljährige Mittelwerte berechnet werden.

Die Versickerung von Niederschlagswasser aus dem durchwurzelteten Boden unter Berücksichtigung der Verdunstung wird als Ersatz für den komplexen Prozess der Grundwasserneubildung benutzt. Analog zur Bestimmung der Höhe der Grundwasserneubildung mittels Lysimetern wird unterstellt, dass alles frei bewegliche und aus dem Niederschlag resultierende Sickerwasser, das die untere Grenze des effektiven Wurzelraums erreicht hat, ohne weitere Verluste in der ungesättigten Zone in den Grundwasserraum gelangt.

4.3.2.1 Berechnungsverfahren

Die Berechnung der flächenhaften Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag erfolgte in Anlehnung an das Verfahren von WESSOLEK [4]. Dieses Verfahren erlaubt die flächenhafte Berechnung der mittleren jährlichen Sickerwassermenge unterhalb des Wurzelraumes mit Hilfe multipler Regressionen, in denen der Sommer- und Winterniederschlag, das pflanzenverfügbare Wasser, die potentielle HAUDE-Verdunstung und die Landnutzung miteinander verknüpft werden.

Für die wichtigsten Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald lauten die Gleichungen:

Acker

$$G_{\text{neu}} = (1,03 \times N_W + 0,86 \times N_S - 128,2 \times \log W_{\text{pfl}} - 0,05 \times \text{Haude} - 92,9) \times R \quad r^2 = 0,97$$

Grünland

$$G_{\text{neu}} = (1,024 \times N_W + 0,914 \times N_S - 118,3 \times \log W_{\text{pfl}} - 0,151 \times \text{Haude} - 122,75) \times R \quad r^2 = 0,95$$

Wald

$$G_{\text{neu}} = (0,907 \times N_W + 0,925 \times N_S - 129,8 \times \log W_{\text{pfl}} - 0,13 \times \text{Haude} - 118,92) \times R \quad r^2 = 0,96$$

G_{neu} : Sickerwasserspende [mm/Jahr]

N_W : Winterniederschlag [mm] im Zeitraum 1. Oktober bis 31. März

N_S : Sommerniederschlag [mm] im Zeitraum 1. April bis 30. September

Haude: Potentielle Jahresverdunstung nach Haude [mm]

W_{pfl} : Pflanzenverfügbare Bodenwassermenge [mm] (nutzbare Feldkapazität im durchwurzelten Bodenraum + kapillarer Aufstieg)

R: Relieffaktor

r^2 : Bestimmtheitsmaß

Die Berechnung der Grundwasserneubildung unter Flächen mit Sondernutzungen erfolgte mit Hilfe der Regressionsgleichung für Acker unter Verwendung der von WESSOLEK (1992) angegebenen Zu- und Abschläge. Die Relieffaktoren wurden nach WESSOLEK (Tab. 3 und 4 aus [4]) in Abhängigkeit von der Nutzung, nFKWe und der Exposition unter Berücksichtigung der Hangneigung ermittelt. Die verwendeten Regressionsgleichungen ermöglichen die Berechnung der Grundwasserneubildung mit einer Genauigkeit von ca. +/-40 mm/Jahr. Die Regressionsgleichungen wurden mit Hilfe eines komplexen Wasserhaushaltsmodells erstellt und für den Raum Frankfurt am Main anhand von Fallstudien modifiziert. Da im Großraum Frankfurt ähnliche Klimabedingungen herrschen wie in dem Rhein-Neckar-Raum, können die für den Umlandverband Frankfurt ermittelten Regressionsbeziehungen auch für dieses Gebiet angewandt werden. Bei dieser regressionsanalytischen Wasserhaushaltsbetrachtung ist zu beachten, dass die standortspezifischen Wasserhaushaltsgrößen pauschal einfließen und eine jahreszeitliche Dynamik durch eine Regressionsgleichung nicht darstellbar ist.

4.3.2.2 Datengrundlage

Für die Berechnung sind folgende digitale Karten erforderlich:

- Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes; Grundlage sind die Bodeneinheiten mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften und bodenphysikalischen Kennwerten
- Niederschlag (Niederschlag im Sommer- und im Winterhalbjahr)
- Verdunstung nach Haude auf Grundlage der täglichen Klimadaten des DWD; je eine Karte für das Jahr und das Sommerhalbjahr
- Bodennutzung aus dem Amtlichen Topographisches Kartographisches Informationssystem (ATKIS) der Landesvermessungsämter, aus denen u.a. die Gelände-nutzung durch Siedlung, Acker, Wiesen, Wald hervorgeht; Auswertung von Satellitenbilder in Baden-Württemberg
- Grundwasserflurabstandskarte, die aus den Grundwasserständen, den daraus erzeugten Höhengleichenplänen und der Gelände-höhe resultieren
- Kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser
- Berechnungsflächen

4.3.2.3 Niederschlag

Dem Niederschlag (Karte 11) kommt als maßgebende Eingangsgröße der Wasserhaushaltsbilanz für die Berechnung der Grundwasserneubildung die größte Bedeutung zu. Da die Niederschläge eine hohe zeitliche und räumliche Variation aufweisen, wurden in einem ersten Schritt die langjährigen Durchschnittswerte zur Beschreibung "mittlerer Verhältnisse" angesetzt. Direkten Eingang in das Berechnungsmodell finden die Mittelwerte des Sommer (April bis September) und des Winterhalbjahres (Oktober bis März des folgenden Jahres). Der Niederschlag des Sommerhalbjahres wird weiterhin zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz für das Sommerhalbjahr verwendet, die zur Begrenzung des aktuellen kapillaren Aufstiegs benötigt wird.

Als Datengrundlage zur Bestimmung des Niederschlags standen die Aufzeichnungen von 26 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: **Messstationen und Höhe des Niederschlags [mm] im Untersuchungsgebiet, Beobachtungszeitraum 1961 bis 1993**

Nr.	Station	vieljährige Jahresmittel des Niederschlags von 1961 bis 1993 [mm]		
		Jahr 1.10. bis 30.9.	Winterhalbjahr 1.10. bis 31.3.	Sommerhalbjahr 1.4. bis 30.9.
70680	Germersheim	704	318	385
70720	Waghäusel	681	307	374
70743	Weinbiet	593	266	327
70748	Neustadt a. d. W.	556	256	300
70752	Rhodt	758	398	360
70755	Speyer	622	281	362
70770	Kronau	706	315	391
70773	Reilingen	688	299	389
70779	Wiesloch	767	345	422
70782	Schwetzingen	691	299	392
71770	Heidelberg	761	341	420
72102	Mannheim/Westh.	659	274	385
72109	Ludw.-Oggersheim	554	231	323
72114	Bad Dürkheim	575	271	304
72117	Hochdorf-Assenheim	527	223	304
72120	Dackenheim	529	230	299
72126	Frankenthal	519	202	317
72129	Dirmstein	552	230	322
72132	Grünstadt	519	226	293
72144	Worms	598	247	351
72201	Hemsbach	768	337	431
72204	Heppenheim	802	358	444
72210	Viernheim	716	305	411
72213	Lamperth.-N.	685	288	397
72216	Biblis	626	281	365
72243	Mettenheim	547	230	317
	Mittelwert im Untersuchungsraum	642	281	361

Da die Stationen jeweils unterschiedlich lange, teilweise mit Datenlücken behaftete Messreihen aufweisen, wurden die fehlenden Daten mit statistischen Methoden ergänzt. Für statistische Analysen und zur weiteren Berechnung wurden die monatlichen Niederschlagssummen der einzelnen Stationen verwendet.

Aufgrund der geringen topographischen Unterschiede im Rhein-Neckar-Raum erfolgte die Übertragung der Punktwerte des Niederschlages auf die Fläche allein durch räumliche Interpolation zwischen den Niederschlagsstationen. Die Regionalisierung der Punktwerte wurde mit der „inverse distance weight“-Methode im Modul Grid von ARC/INFO durchgeführt.

Die Sickerwasserhöhe wurde für die einzelnen Jahre berechnet und damit eine Variable für die instationäre Modellkalibrierung vorgegeben. Da für diese Zeiträume die durchschnittlichen Niederschlagsverhältnisse der gesamten Region und nicht die kleinräumige Variation des Eingabeparameters Niederschlag von Interesse sind, wurde die regionale Verteilung vieljähriger mittlerer Niederschläge mit Hilfe von Faktoren auf die Fläche umgelegt. Der Faktor beschreibt hierbei die mittlere Abweichung der Niederschlagshöhen eines Jahres und dessen Winter- und Sommerhalbjahr vom vieljährigen Durchschnitt

4.3.2.4 Potentielle Evapotranspiration nach HAUDE

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration, d.h. die Verdunstung über einem Pflanzenbestand bei ausreichender Wasserversorgung der Pflanzen, erfolgte im hessischen Teil des Untersuchungsgebietes nach HAUDE [5]. Dieses Verfahren wurde ausgewählt, weil es nicht nur vergleichsweise unkompliziert ist, d.h. mit wenigen, an relativ vielen DWD-Stationen gemessenen Kenngrößen auskommt, sondern sich aufgrund vergleichender Untersuchungen speziell für die klimatischen Verhältnisse in Deutschland als gut geeignet herausgestellt hat. Bei diesem Verfahren wird das aus der jeweils um 14 Uhr gemessenen Lufttemperatur und der Luftfeuchte errechnete Sättigungsdefizit der Luft mit einem jahreszeitlich variierenden Faktor multipliziert. Eine Zusammenstellung der potentiellen HAUDE-Verdunstung für Gras an 5 ausgewählten Klimastationen, berechnet aus monatlichen Mittelwerten der Lufttemperatur und der Luftfeuchte unter Verwendung der in SCHRÖDTER [6] angegebenen Monatsfaktoren für den Zeitraum von 1961 bis 1993 zeigt Tabelle 4.3.

Tab. 4.3: **Potentielle Verdunstung nach HAUDE im Zeitraum von 1961 bis 1993**

Station	vieljährige Jahresmittel der Verdunstung von 1961 bis 1993 [mm]		
	Jahr 1.10. bis 30.9.	Winterhalbjahr 1.10. bis 31.3.	Sommerhalbjahr 1.4. bis 30.9.
Gernsheim	727	130	597
Worms	719	133	586
Darmstadt	676	124	552
Mannheim	714	133	581
Karlsruhe	690	129	561

Der Jahresmittelwert der potentiellen HAUDE-Verdunstung für Gras im rheinland-pfälzischen und im baden-württembergischen Gebiet wurde den Rasterkarten des Deutschen Wetterdienstes [7] entnommen

Infolge des verhältnismäßig trocken-warmen Klimas im Rhein-Neckar-Raum kann man davon ausgehen, dass die Verdunstung von freien Wasserflächen, hier Binnenseen, in der Regel größer als die Niederschläge sind. Im Rechenmodell wurde die Verdunstung der freien Wasserflächen im rheinland-pfälzischen und im baden-württembergischen Gebiet mit dem Wert der potentiellen HAUDE-Verdunstung gleichgesetzt, während in Hessen der 1,5-fache Wert verwendet wurde. Die Grundwasserneubildung der Wasserflächen ist somit meistens negativ, d.h., dass die Wasserflächen in der Regel keinen Beitrag zur Grundwasserneubildung leisten, sondern im Gegenteil dem Grundwasser eine nennenswerte Wassermenge entziehen.

Die Berechnung der Haude-Verdunstung für die einzelnen Jahre wurde in gleicher Weise wie die Niederschlagsberechnung durchgeführt.

4.3.2.5 Bodennutzung

Die Bodennutzung wurde im hessischen Teil des Untersuchungsgebietes dem Amtlichen Topographischen Kartographischen Informationssystem (ATKIS) des Landesvermessungsamtes entnommen. Da in Rheinland-Pfalz die ATKIS-Daten nicht vollständig zur Verfügung standen, wurde die Bodennutzung teilweise aus den neuesten Ausgaben der topografischen Karten TK 25 übernommen. In Baden-Württemberg wurden Satellitenaufnahmen für die Bestimmung der Bodennutzung verwendet. Insgesamt werden 14 Bodennutzungsarten unterschieden.

Da keine exakten Daten über die Grundwasserneubildung im Bereich von Siedlungsflächen vorliegen, wird folgende Annahme gemacht:

- Die Stadtzentren werden als versiegelte Flächen angesehen, in denen der überwiegende Teil der Niederschläge durch das Kanalnetz direkt in die Vorfluter gelangt,
- alle übrigen Siedlungs- und Industriegebiete lassen eine verringerte Grundwasserneubildung aus Niederschlag zu, die 1/3 der Sickerwasserspense von Grünlandflächen im entsprechenden Raum beträgt,
- und es wird angenommen, dass Parks, Gärten, Spielplätze und Sportanlagen durch Grünland am ehesten repräsentiert werden.

4.3.2.6 Pflanzenverfügbares Bodenwasser (W_{Pff})

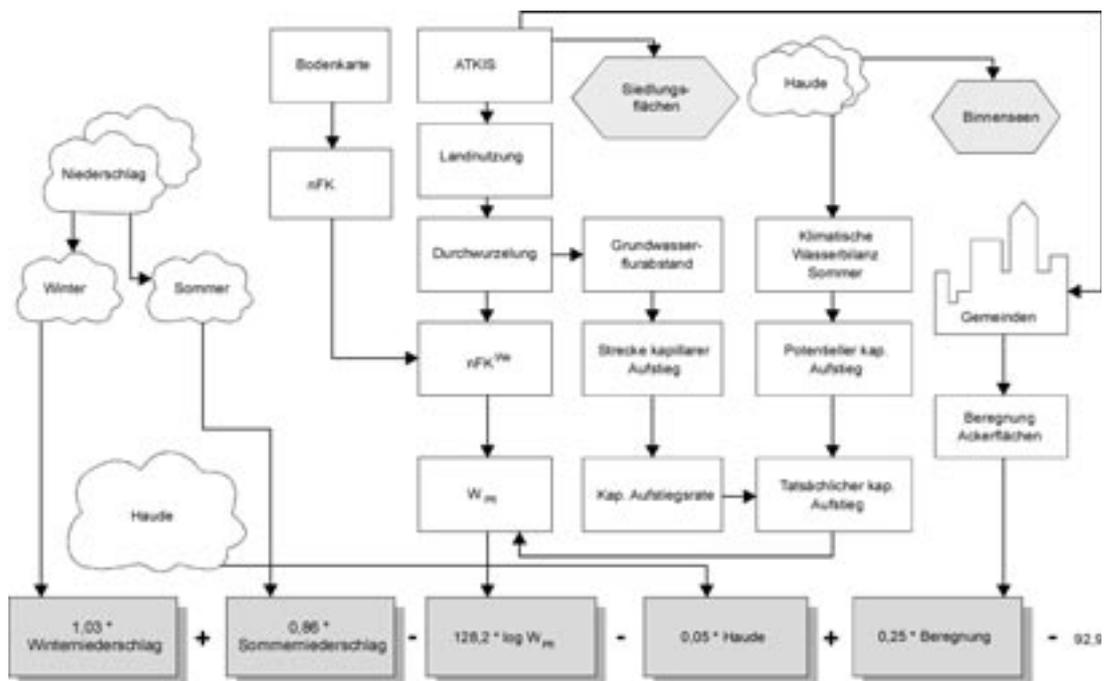
Das pflanzenverfügbare Bodenwasser entspricht bei grundwasserfernen Standorten der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFK_{We}). Die nFK_{We} [mm] ist die Summe der nutzbaren Feldkapazität, nFK mit Porengrößen von 50 bis $0,2 \mu m$, aller Bodenhorizonte bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe (We). Als effektive Durchwurzelungstiefe wurde für einjährige landwirtschaftliche Nutzpflanzen 100-120 cm, für Waldbestände 170-190 cm und für Grünland 60-80 cm angenommen.

Die nFK der einzelnen Bodenhorizonte wurde nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung, 3. Auflage [8], aus der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem Gehalt an organischer Substanz abgeschätzt. Die Ergebnisse zahlreicher Bodenuntersuchungen waren hierzu hilfreich. Bodenartenschichtung und Schichtmächtigkeit sind in der Bodenkarte (Karte 14) dargestellt. Die nFK_{We} erhält man durch Addition der bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe horizontweise berechneten nFK -Werte.

Bei grundwassernahen Böden ist bei der Ermittlung der Gesamtmenge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser neben der nFK_{We} auch der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum zu berücksichtigen. Die mittleren täglichen Aufstiegsraten wurden in Abhängigkeit von der Bodenart, dem Abstand zwischen der mittleren Grundwasseroberfläche und der Untergrenze des effektiven Wurzelraumes unter Zugrundelegung einer mittleren Lagerungsdichte der „Tabelle 51 der Bodenkundlichen Kartieranleitung“ entnommen. Als mittlere Grundwasseroberfläche wurde der Grundwasserstand vom 1.10.1990 zugrunde gelegt. Bei der Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers sind die täglichen Aufstiegsraten mit der Anzahl der Tage des Sommerhalbjahres zu multiplizieren und müssen zur nFK_{We} hinzu gezählt werden. Die jährliche Aufstiegsrate darf zusammen mit dem Niederschlag im Sommerhalbjahr nicht größer sein als die potentielle Evapotranspiration.

In einigen Gebieten des Untersuchungsraumes reichen die Niederschläge während der Vegetationsperiode und die nFK_{We} der grundwasserfernen lehmig-sandigen Böden nicht aus, um den Wasserbedarf der Pflanzen zu decken. Zur Sicherung und Steigerung der Erträge wird daher die Feldberegnung eingesetzt. Beregnet wird hauptsächlich im hessischen Ried und in der Vorderpfalz. Die jährliche Beregnungsmenge beträgt im vieljährigen Durchschnitt 60-100 mm. Das Beregnungswasser, das in der Vorderpfalz aus dem Otterstädter Altrhein und in Hessen aus dem Grundwasser entnommen wird, versickert teilweise, was bei der Grundwasserbilanzierung berücksichtigt werden muss. Landwirtschaftliche Berater, schätzen den versickerungsrelevanten Anteil des Beregnungswassers auf 25 % der ausgebrachten Beregnungsmenge. Diese Schätzung entspricht auch einem Mittelwert der in der Literatur angegebenen Verlustmengen. Im Rechenmodell werden daher 25 % der Beregnungsmenge zu der Sickerwasserspende hinzugerechnet.

Abb. 4.34: Schematische Darstellung der Berechnungsschritte für die Ermittlung der Sickerwasserhöhe



* Berechnung der Sickerwasserspende für Ackerstandorte nach WESSOLEK (1992)

4.3.2.7 Berechnung der Sickerwasserhöhe

Das Flussdiagramm (Abb. 4.34) verdeutlicht das Konzept und die verwendeten Eingabeparameter zur Berechnung der Sickerwasserhöhe. Das dargestellte Flusschema und die Rechenoperationen werden für jede Zelle (25 m x 25 m) der betrachteten Fläche durchgeführt. Somit kann die Sickerwasserhöhe flächendeckend in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten dargestellt werden.

4.3.2.8 Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Karte 11)

Die Sickerwasserhöhen wurden für vieljährige mittlere Niederschlagshöhen der Zeiträume von 1961 bis 1993 und von 1983 bis 1993 berechnet. Ebenso wurde für die instationäre Modellkalibrierung der jährliche Sickerwasserzufluss benötigt.

Die berechneten Versickerungen, die in der Tabelle 4.4 aufgeführt sind, haben überwiegend positive Werte. In den einzelnen Jahren kann sie doppelt so hoch wie das vieljährige Mittel sein, in Trockenjahren kann die Neubildung ganz ausfallen bis hin zu einem Grundwasseraufbrauch. Dies ist nur möglich auf Seeflächen und dort, wo mit kapillarem Aufstieg bei Grundwasserflurabständen geringer als 2 m zu rechnen ist.

Zeitraum Abflussjahr	berechnete Versickerung	
	[mm]	[l/s×km ²]
1983	228	7,2
1984	149	4,7
1985	24	0,8
1986	127	4,0
1987	164	5,2
1988	180	5,7
1989	70	2,2
1990	61	1,9
1991	0	0
1992	75	2,4
1993	40	1,3
1961 bis 1993	106	3,4
1983 bis 1993	102	3,2

Tab.4.4: **Berechnete Versickerungen im Untersuchungsraum**

In der Karte 11 ist die mittlere Grundwasserneubildung (Zeitraum 1961 bis 1993) aus dem Niederschlag und die Niederschlagsisohyeten dargestellt.

Rheinland-Pfalz

Das Planungsgebiet gehört zu den klimatisch begünstigten Landschaften des nördlichen Oberrheintiefenlandes, das sich durch warme Sommer und milde Winter auszeichnet. Die mittlere wirkliche Lufttemperatur liegt im Jahr deutlich über 9°C. Entsprechend der Lage im Regenschatten des Pfälzerwaldes beträgt die mittlere Jahres-

summe des Niederschlags im Zeitraum 1961 - 1993 565 mm. Die Spanne reicht von 519 bis zu 678 mm/a. Die Niederschlagshöhe des Sommerhalbjahres übertrifft mit 57 % im allgemeinen die des Winterhalbjahres. Da die Verdunstung in der Hauptvegetationsperiode am größten ist, wirkt sich diese Niederschlagsverteilung für die Grundwasserneubildung recht ungünstig aus. Die mittlere Grundwasserneubildungsrate beträgt im Zeitraum 1983-1993 ca. 61 mm/a (= 1,9 l/s x km²). In trockenen Jahren ist eine Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag nicht zu erwarten.

Hessen

Analog zu der Niederschlagsverteilung ist die Neubildung im Westen gering, sie nimmt nach Osten hin zu und ist am Rande des Odenwaldes relativ groß. In den Auewäldern in der Rheinniederung mit den lehmigen Böden und geringem Niederschlag beträgt die Grundwasserneubildung 1 -2 l/s x km² im Mittel und bleibt in Trockenjahren aus. Das Waldgebiet zwischen Viernheim, Lorsch und Bürstadt hebt sich deutlich durch verringerte Versickerung gegenüber den umgebenden Ackerflächen ab. Die Acker- und Grünlandflächen auf sandigem Boden nahe am Odenwald begünstigen die Versickerung der höheren Niederschläge, so dass die Grundwasserneubildung über 8 l/s x km² betragen kann.

In den Stadtgebieten von Heppenheim und Bürstadt gab es in den Trockenperioden 1977 und 1993 Gebäudeschäden infolge der niedrigen Grundwasserstände und der damit verbundenen Bodensetzungen. In Hüttenfeld sind bei niedrigen Grundwasserständen in den Trockenperioden neue Siedlungen gebaut, die Fundamente jedoch falsch gegründet und die Keller unsachgemäß abgedichtet worden, so dass es in Nassjahren zu Kellervernässungen kommt.

Baden-Württemberg

Die mittleren Niederschlagshöhen steigen hier ausgehend von rd. 650 mm/a in der Rheinniederung auf rd. 750 mm/a am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes an. Die Flurabstände steigen von der Rheinniederung zum Niederterassenbereich und weiter zum Grabenrand an. Grundwasserzehrungen können damit außerhalb der Rheinniederung nicht mehr erfolgen. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung ist im Niederterassenbereich südlich des Neckars mit Werten zwischen 150 und 300 mm/a außerhalb bebauter Gebiete am höchsten. Die Neubildung ist in diesem Teilgebiet auch eine ganz wesentlich Grundwasserbilanzkomponente (Karte 17a). Bebaute Gebiete pausen sich in der Grundwasserneubildungskarte durch. Die Grundwasserneubildung erreicht, abhängig von der Dichte der Bebauung, nur noch durchschnittlich 0 bis 100 mm/a. Im gesamten Großraum Mannheim erfolgt keine wesentliche Grundwasserneubildung durch Niederschlag.

4.3.3 Wechselwirkung mit oberirdischen Gewässern

Bei der Wechselwirkung zwischen oberirdischen Gewässern und dem Grundwasser können grundsätzlich drei Fälle unterschieden werden.

Der erste Fall beschreibt eine Situation tiefliegenden Grundwassers mit einem Gewässerlauf, der demzufolge ständig in das Grundwasser infiltriert (Gewässersohle liegt über dem Grundwasser) und zwar in einem Umfang, welcher der Wassertiefe im Gewässer proportional ist. Die Infiltrationsraten sind hierbei erfahrungsgemäß vergleichsweise gering.

Im zweiten Fall liegt der Grundwasserspiegel oberhalb der Gewässersohle innerhalb des Schwankungsbereichs des Wasserspiegels des Gewässers. Bei dieser Situation kommt es abhängig von der Potenzialdifferenz zwischen Grundwasserstand und dem Wasserstand im Gewässer zu In- und Exfiltrationen unterschiedlicher Größe. Bei gleichen Potenzialdifferenzbeträgen ist die Exfiltrationsrate in den meisten Fällen höher als die Infiltrationsrate.

Im dritten Fall liegt der Grundwasserspiegel über dem Wasserspiegel des Gewässers und demzufolge entzieht das Gewässer dem Aquifer permanent Grundwasser (Drainagewirkung). Die Exfiltrationsrate ist hierbei wiederum proportional zur Potenzialdifferenz zwischen dem Grundwasser und dem Wasserstand im Gewässer. Diese Situation ist immer mit geringen Flurabständen des Grundwassers verbunden und hat großen Einfluss auf die Grundwasser-Verhältnisse.

Die Wechselwirkung zwischen dem Grundwasser und den oberirdischen Gewässern nimmt in der Grundwasserbilanz eine erhebliche Größenordnung ein (Kap. 7). Eine detaillierte quantitative Betrachtung ist i. d. R. nur durch die Berücksichtigung der oberirdischen Gewässer im Grundwassermodell nach dem Leakage-Prinzip möglich. Hierbei muss die Größe des Übergangswiderstands (sog. Leakage-Koeffizient), den die Gewässersohle darstellt, angepasst werden. Die Hauptgewässer mit In- und Exfiltration in das Grundwasser sind im Untersuchungsgebiet der Rhein, der Neckar und die Weschnitz. Die Gesamtzusickerung aus den oberirdischen Gewässern in das Grundwasser betrug für die stationär reproduzierte Situation im Oktober 1990 rd. 118 Mio. m³/a, die Grundwasseraustritte in die oberirdischen Gewässer rd. 111 Mio. m³/a.

4.3.4 Unterirdische Randzuströme

Die unterirdischen Randzu- und -abströme müssen i. d. R. für definierte Untersuchungsgebiete abgeschätzt werden. Hierfür können unterschiedliche Methoden angewandt werden.

Eine Methode stellt die qualitative Betrachtung des hydrochemischen Kontrastes zwischen dem Grundwasser im Untersuchungsgebiet und außerhalb im Zustrombereich dar. Liegen für den angrenzenden unterirdischen Zustrombereich entsprechende Werte vor, können ggf. Randbereiche mit stärkeren von solchen mit weniger starken Wasserzutritten abgegrenzt werden. Zunehmend schwieriger wird hierbei eine vertikale Differenzierung für mehrschichtige Grundwasservorkommen.

Eine weitere Methode ist die überschlägige Bestimmung der Wasserzutritte mit den Systemparametern und Geometrien am Rand des Untersuchungsgebiets und den maßgebenden hydraulischen Gradienten. Voraussetzung hierfür ist eine detaillierte hydrogeologische Modellvorstellung (Kap. 3) und gut belegte, d.h. sichere Grundwasserhöhengleichen im Randbereich. Eine dritte hier erwähnte Methode ist die quantitative Auswertung der Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflussverhältnisse im maßgeblichen Randbereich. Eine vertikale Differenzierung der unterirdischen Wasserzutritte ist hierbei nicht möglich.

Die letzte hier angeführte Bestimmungsvariante ist die Identifizierung im Rahmen der Eichung eines numerischen Grundwassermodells. Hierbei wird am Rand des Modellgebiets eine Zuflussrandbedingung angesetzt und solange angepasst, bis die randnahen Messwerte des Grundwasserstandes realistisch reproduziert werden. Das Ergebnis dieser Bestimmungsmethode für das vorliegende Untersuchungsgebiet des Rhein-Neckar-Raums kann der Wasserbilanz in Kapitel 7 entnommen werden. Oft kommen zur Abschätzung bzw. Bestimmung dieser Bilanzkomponente verschiedene Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Das Grundwasservorkommen im Rhein-Neckar-Raum erhält, wie das gesamte Vorkommen im Oberrheingraben, von den Gebirgsrändern im Westen und Osten einen unterirdischen Zustrom. Innerhalb des Oberrheingrabens erfolgt der generellen Grundwasserströmungsrichtung folgend von Süden ein Zustrom und nach Norden ein Abstrom.

4.3.5 Speicherfüllung und -entleerung

Aus der Sicht der Grundwasserbilanz ist nur der im Oberen Grundwasserleiter mit freier Oberfläche ablaufende Füllungs- und Entleerungsprozess, der sich durch die Änderung des Grundwasserstandes zeigt, von Bedeutung. Die in den tieferen Bereichen, abhängig von der Kompressibilität des Wassers und Korngerüsts, gespeicherten bzw. freigegebenen Mengen sind demgegenüber vernachlässigbar.

Die Speicherfüllung bzw. -entleerung innerhalb eines betrachteten Zeitabschnitts lässt sich durch den Vergleich zweier Grundwasserspiegel und entsprechender Volumenbetrachtungen unter Berücksichtigung des nutzbaren Hohlraumanteils berechnen. In Karte 10c ist beispielsweise die Differenz der Wasserstände zwischen den Stichtagen 1.10.1990 und 4.10.1993 dargestellt. Die Speicherentleerung vom 01.10.1990 bis zum 04.10.1993 hat unter Annahme eines mittleren nutzbaren Hohlraumanteils von 15 % rd. 62 Mio. m³ betragen.

Im Rahmen der instationären Modelleichung wird dieser sog. Speicherkoeffizient für das Untersuchungsgebiet ermittelt und für jeden Zeitschritt der Speicheranteil berechnet (Kap. 7, Tab. 7.2).

4.3.6 Grundwasserentnahmen und -anreicherungen

Wegen der sehr unterschiedlichen industriellen und landwirtschaftlichen Infrastruktur sowie Flächennutzung im Untersuchungsgebiet der drei Länder, ist die Entwicklung der Grundwasserförderung über den Zeitraum 1983 bis 1998 im baden-württembergischen, hessischen und rheinland-pfälzischen Teil kaum miteinander vergleichbar. Daher werden die Verhältnisse nachfolgend länderspezifisch erläutert. Zur Übersicht der historischen Entnahmeentwicklung über den Zeitraum 1970 bis 1998, wurden die Entnahmemengen von 1970 bis 1982 aus der HGK 1987 (Stufe II) übernommen und tabellarisch sowie grafisch ergänzend dargestellt.

In den Karten 7 und 10a sind jeweils die Lage der Brunnen der Öffentlichen Wasserversorgung abgebildet und ergänzend die entsprechenden Versorgungsunternehmen namentlich zugeordnet. Die wichtigsten Brauchwasserbrunnen von Industrie, Gewerbe und Beregnungsverbänden sind ebenfalls mit Symbolen gekennzeichnet, jedoch nicht benannt.

Im **rheinland-pfälzischen Teil** des Untersuchungsraumes, dem im Hinblick auf die Grundwasserbilanzierung auch der knapp außerhalb gelegene Raum Speyer-Süd und Waldsee zugeordnet werden muss, stiegen die Grundwasserentnahmen seit 1983 von rd. 60 Mio. m³ bis zum Jahr 1990 mit rd. 64 Mio. m³ um rd. 6,5 % an, danach fielen sie bis 1993 wiederum auf rd. 60 Mio. m³. Die Grundwasserentnahmen für die öffentliche Trinkwasserversorgung und die Brauchwasserversorgung liegen seit 1993 bis zum aktuellen Jahr 1998 auf einem gleichbleibenden Niveau von rd. 60 Mio. m³. Unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung im Ballungsraum Ludwigshafen-Frankenthal-Speyer wurde für das Jahr 2010 ein Anstieg der Gesamtentnahmen gegenüber 1996 von rd. 59 Mio. m³ auf rd. 62 Mio. m³ prognostiziert und in der Prognosevariante 2010 berücksichtigt. In der Tabelle 4.5 und der Abbildung 4.35 sind die Trink- und Brauchwasserentnahmen jahresweise aufgelistet bzw. dargestellt und zwar getrennt nach Entnahmen aus dem Oberen Grundwasserleiter (OGWL) und Entnahmen aus den tieferen Grundwasserleitern (tGWL).

Die Entnahmen der öffentlichen Wasserversorgung schwanken im Betrachtungszeitraum 1983-1998 zwischen max. 35,3 Mio. m³ im Jahr 1991 und min. 32,4 Mio. m³ im Jahr 1998. Während dieses Zeitraums wurde das Gewinnungsgebiet Speyer-Nord erschlossen, aus einem Tiefbrunnen werden seit 1993 jährlich rd. 1,0 Mio. m³/a Grundwasser gefördert und in der gleichen Größenordnung das Gewinnungsgebiet Speyer-Süd entlastet. Von den in 1993 geförderten 33,4 Mio. m³ Grundwasser für die öffentliche Wasserversorgung wurden nur 1,1 Mio. m³ (Speyer-Süd) aus dem Oberen Grundwasserleiter gefördert. Für die Prognose 2010 wird die Förderung in Speyer-Nord auf 2,0 Mio. m³/a erhöht und eine weitere Entlastung von Speyer-Süd berücksichtigt.

Die Entnahmen durch Gewerbe und Industrie lagen zwischen rd. 26,0 Mio. m³ (1990) und rd. 23,0 Mio. m³ (1993). 10 % der Brauchwasserentnahmen werden durch kleinere Gewerbe- und Industriebetriebe im Stadtgebiet von Frankenthal und Ludwigshafen, rd. 23,0 Mio. m³/a durch Tiefbrunnen im Firmenbereich der BASF AG gefördert. 1998 lagen die Brauchwasserentnahmen bei rd. 24,6 Mio. m³, diese Größenordnung wurde auch für die Prognose 2010 angesetzt.

Im Untersuchungsraum erfolgt eine intensive Landwirtschaft durch den Anbau von Gemüse und Sonderkulturen. Aufgrund der klimatischen Verhältnisse sind Beregnungsgaben in den Vegetationsperioden notwendig. Der „Wasser- und Bodenverband zur Beregnung der Vorderpfalz“ versorgt heute rd. 12.000 ha Verbandsfläche über ein Netz an Versorgungsleitungen und Unterflurhydranten mit Beregnungswasser aus dem Otterstädter Altrhein. Im Zeitraum 1976 bis 1981 lagen die Abgabemengen bei rd. 4,0 Mio. m³/a, in den Jahren 1982 bis 1988 wurden rd. 7 bis 8 Mio. m³/a Rheinwasser beregnet, die Abgabemengen stiegen auf rd. 12 Mio. m³/a, in Trockenjahren wie 1991, 1993 und auch 1997 wurden 13 bis 15 Mio. m³/a abgegeben. Nach wie vor werden landwirtschaftliche Flächen in den Bereichen „Maudacher Bruch“, Lamsheim-Maxdorf und nördlich der Autobahn A6 durch private Beregnungsbrunnen mit Grundwasser beregnet. Bei einer geschätzten Gesamtfläche von rd. 3.500 ha wird entsprechend den meteorologischen Gegebenheiten abgeleitet, dass im Zeitraum 1983 bis 1998 zwischen 1,0 bis 3,2 Mio. m³/a Grundwasser aus dem Oberen Grundwasserleiter durch private Beregnungsbrunnen entnommen wurde. Für die Prognose 2010 werden 2,5 Mio. m³/a an Privatentnahmen für die Beregnung angesetzt.

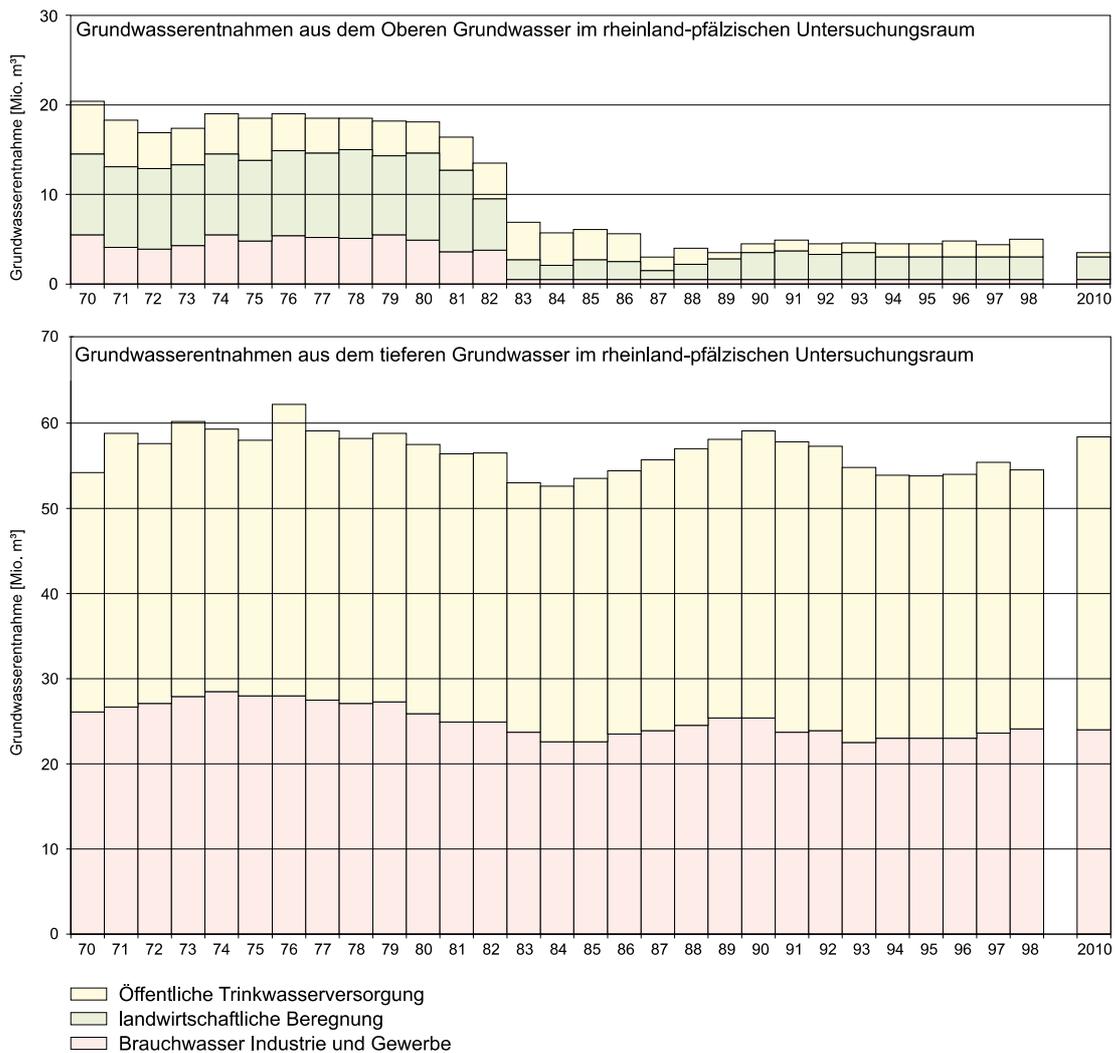
Tab.4.5: **Grundwasserentnahmen [Mio. m³] im Teilgebiet Rheinland-Pfalz
Übersicht 1970 bis 1982 aus HGK 1987, Fortschreibung 1983 bis 1998**

Jahr	GW-Leiter	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
öffentliche Trinkwasser- versorgung	OGWL	5,9	5,2	4,0	4,1	4,5	4,7	4,1	3,9	3,5	3,9	3,5	3,7	4,0
	tGWL	28,1	32,1	30,5	32,3	30,8	30,0	34,2	31,6	31,1	31,5	31,6	31,5	31,6
	total	34,0	37,3	34,5	36,4	35,3	34,7	38,3	35,5	34,6	35,4	35,1	35,2	35,6
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe	OGWL	5,5	4,1	3,9	4,3	5,5	4,8	5,4	5,2	5,1	5,5	4,9	3,6	3,8
	tGWL	26,1	26,7	27,1	27,9	28,5	28,0	28,0	27,5	27,1	27,3	25,9	24,9	24,9
	total	31,6	30,8	31,0	32,2	34,0	32,8	33,4	32,7	32,2	32,8	30,8	28,5	28,7
landwirtschaftliche Beregnung γ	OGWL	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5	9,4	9,9	8,8	9,7	9,1	5,7
Gesamtentnahmen		74,6	77,1	74,5	77,6	78,3	76,5	81,2	77,6	76,7	77,0	75,6	72,8	70,0

Jahr	GWL-Liefer	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	Prognose 2010 ^{*)}
öffentliche Trinkwasserversorgung	OGWL	4,2	3,6	3,4	3,1	1,5	1,8	0,7	1,0	1,2	1,2	1,1	1,5	1,5	1,8	1,4	2,0	0,5
	IGWL	29,3	30,0	30,9	30,9	31,8	32,5	32,7	33,7	34,1	33,4	32,3	30,9	30,8	31,0	31,8	30,4	34,4
	total	33,5	33,6	34,3	34,0	33,3	34,3	33,4	34,7	35,3	34,6	33,4	32,4	32,3	32,8	33,2	32,4	34,9
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe	OGWL	0,5 ^{*)}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	IGWL	23,7	22,6	22,6	23,5	23,9	24,5	25,4	25,4	23,7	23,9	22,5	23,0	23,0	23,0	23,6	24,1	24,0
	total	24,2	23,1	23,1	24,0	24,4	25,0	25,9	25,9	24,2	24,4	23,0	23,5	23,5	23,5	24,1	24,6	24,5
landwirtschaftliche Beregnung ^{*)}	OGWL	2,2	1,6	2,2	2,0	1,0	1,7	2,3	3,0	3,2	2,8	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Gesamterntnahmen		59,9	58,3	59,6	60,0	58,7	61,0	61,6	63,6	62,7	61,8	59,4	58,4	58,3	58,8	59,8	59,5	61,9

*) geschätzt **) von WVU erhoben, teilweise geschätzt

Abb. 4.35: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Rheinland-Pfalz



Im **baden-württembergischen Teil** des Untersuchungsgebiets kann für die Zeitspanne 1992 bis 1998 eine deutlich rückläufige Entwicklung der Gesamtentnahmemengen festgestellt werden. Zwischen 1983 und 1991 war kein eindeutiger Trend erkennbar (Tab. 4.6 und Abb. 4.36). Lagen die Entnahmen 1983 noch bei rd. 99 Mio. m³ bzw. im Jahr 1985 bei max. rd. 102 Mio. m³, so fielen die Entnahmen bis 1993 auf rd. 91 Mio. m³ und weiter bis 1998 auf rd. 82 Mio. m³. Die Gesamtentnahmen verteilen sich derzeit zu rd. 51 % auf den Oberen Grundwasserleiter (OGWL) bzw. 49 % auf die tieferen Grundwasserleiter (tGWL) unterhalb des Oberen Zwischenhorizonts (OZH). 1983 betrug der Anteil aller Grundwasserentnahmen aus dem OGWL noch rd. 63 % bzw. aus den tGWL unterhalb des OZH rd. 37 %. Diese Verschiebung hin zu den tGWL ist größtenteils auf die Inbetriebnahme der tiefen Brunnen des Wasserwerks Schwetzingen Hardt im Jahr 1989 zurückzuführen. Seit 1992 ist die rückläufige Entwicklung der Entnahmen auch in den tGWL zu beobachten.

Die Entnahmen der öffentlichen Wasserversorgung (öVV) betragen zwischen 1983 und 1993 rd. 60 Mio. m³/a. Zwischen 1983 und 1991 ist kein Trend bei der Gesamtentnahme der öVV erkennbar. Zwischen 1991 und 1998 ist ein deutlicher Entnahmerückgang von fast 63 Mio. m³/a auf rd. 53 Mio. m³/a (-15 %) zu verzeichnen. Zwischen 1990 und 1992, während der Abwärtsentwicklung der Grundwasserstände von 1989 bis 1993, waren die Entnahmen der öVV leicht überdurchschnittlich. Betrachtet man die Entwicklung der Grundwasserförderungen differenziert nach Grundwasserstockwerken, so fällt auf, dass die Entnahmen in den tGWL deutlich zugenommen haben. Von rd. 17 Mio. m³ im Jahr 1983 stiegen diese Entnahmen bis auf rd. 32 Mio. m³ im Jahr 1991 an und sind bis 1998 wieder auf rd. 28 Mio. m³ gefallen. Der Anstieg bis 1991 erklärt sich wiederum größtenteils durch die bereits erwähnte Inbetriebnahme der tiefen Brunnen im Wassergewinnungsgebiet Schwetzingen Hardt. Der Anteil an oberflächennah durch die öVV geförderten Grundwassers hat sich von rd. 72 % im Jahr 1983 auf rd. 49 % im Jahr 1991 verringert. Entsprechend vergrößerte sich der Anteil des aus den tGWL geförderten Grundwassers für die öVV in diesem Zeitraum von rd. 28 % auf rd. 51 %. Seit 1991 bleiben diese Anteile in etwa konstant, d.h. die Entnahmereduzierungen entlasten den oGWL und die tGWL zu gleichen Teilen.

Bei den Grundwasserentnahmen für Gewerbe und Industrie kann eine insgesamt rückläufige Entwicklung ab dem Jahr 1988 festgestellt werden. Ausgehend von rd. 38 Mio. m³ im Jahr 1983 stiegen die Entnahmen zunächst noch leicht auf 42 Mio. m³ bis 1987 an. Seit 1988 sind Wasserentnahmen entgeltpflichtig. Dies dürfte im Brauchwasserbereich einen Anreiz zu verstärktem Einsatz von wassersparenden Herstellungsprozessen geschaffen haben. Die rückläufige Entwicklung aus dem vorhergehenden Berichtszeitraum, als die Brauchwasserentnahmen von rd. 68 Mio. m³ im Jahr 1965 auf rd. 42 Mio. m³ im Jahr 1983 zurückgingen, hat sich damit im wesentlichen fortgesetzt. Im Jahr 1998 betragen die Brauchwasserentnahmen noch rd. 28 Mio. m³. Erfreulicherweise entlastet die gesamte Reduzierung insbesondere die tGWL, während die Entnahmen im OGWL 1998 nur geringfügig unter denjenigen des Jahres 1983 lagen. Der Anteil an oberflächennah durch die Industrie geförderten Grundwassers ist daher von rd. 47 % im Jahr 1983 auf rd. 55 % im Jahr 1996 gestiegen. Entsprechend verringerte sich der Anteil des aus den tGWL geförderten Grundwassers in diesem Zeitraum von rd. 53 % auf rd. 45 %.

Die Grundwasserentnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung lagen über den gesamten Berichtszeitraum bei rd. 1,3 Mio. m³/a und wurden vollständig aus dem OGWL gefördert.

Entnahmen zur Grundwasserhaltung bei Baumaßnahmen und der Sanierung von Grundwasserunreinigungen wurden nicht systematisch recherchiert. Viele dieser Entnahmen sind von relativ kurzer Dauer an unterschiedlichen Orten. Sie wurden daher in die Beschrei-

bung der vieljährigen Entwicklung der Grundwasserentnahmen im Rhein-Neckar-Raum nicht miteinbezogen.

Der für die Prognosevariante (Jahr 2010) angesetzte Wasserbedarf wurde aus einer im Jahr 1997 von der Universität Hannover für die Mannheimer Verkehrs- und Versorgungsbetriebe erstellten Bedarfsprognose entnommen. Von den darin untersuchten Szenarien wurde auf eine mittlere Variante zurückgegriffen, die in Anbetracht des in den letzten Jahren beobachteten Verbrauchsrückgangs realistisch erscheint. Dies führt im Vergleich zu den Entnahmemengen im Jahr 1996 für das Jahr 2010 zu einer Abnahme der Entnahmemengen um 7 % im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung bzw. um 15 % im industriellen Bereich.

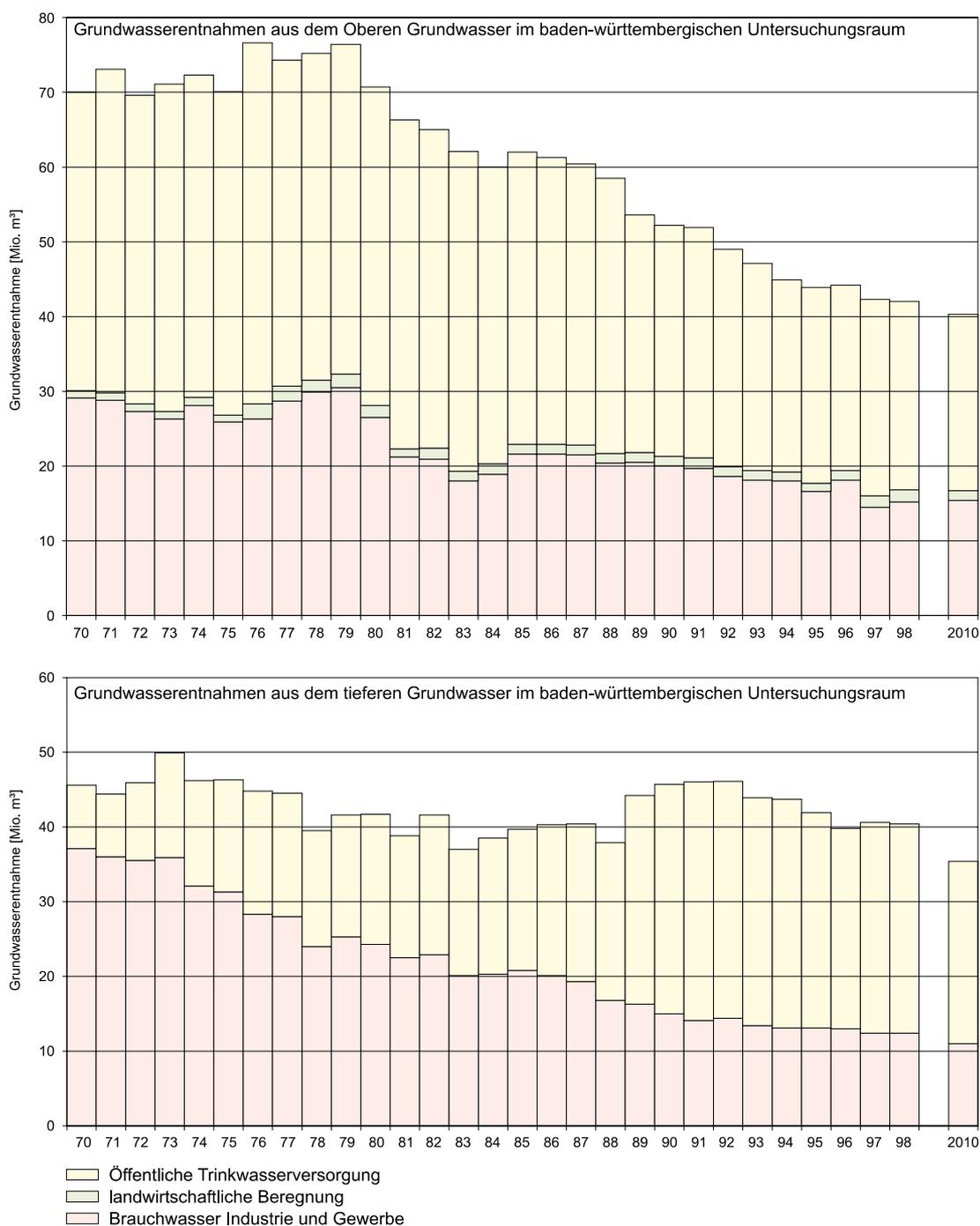
Tab. 4.6: **Grundwasserentnahmen [Mio. m³] im Teilgebiet Baden-Württemberg
Übersicht 1970 bis 1982 aus HGK 1987, Fortschreibung 1983 bis 1998**

Jahr	GW-Leiter	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
öffentliche Trinkwasserversorgung	OGWL	39,9	43,3	41,3	43,8	43,1	43,3	48,3	43,6	43,7	44,1	42,6	44,0	42,6
	tGWL	8,5	8,4	10,4	14,0	14,1	15,0	16,5	16,5	15,5	16,3	17,4	16,3	18,7
	total	48,4	51,7	51,7	57,8	57,2	58,3	64,8	60,1	59,2	60,4	60,0	60,3	61,3
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe	OGWL	29,1	28,8	27,3	26,3	28,1	25,9	26,3	28,7	29,9	30,5	26,5	21,2	20,9
	tGWL	37,1	36,0	35,5	35,9	32,1	31,3	28,3	28,0	24,0	25,3	24,3	22,5	22,9
	total	66,2	64,8	62,8	62,2	60,2	57,2	54,6	56,7	53,9	55,8	50,8	43,7	43,8
landwirtschaftliche Beregnung *)	OGWL	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	0,9	2,0	2,0	1,6	1,8	1,6	1,1	1,5
Gesamtentnahmen		115,6	117,5	111,5	121,0	118,5	116,4	121,4	118,8	114,7	118,0	112,4	105,1	106,6

Jahr	GW-Leiter	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	Prognose 2010 **)
öffentliche Trinkwasserversorgung	OGWL	42,8	39,7	39,1	38,4	37,6	36,8	31,8	30,9	30,8	29,1	27,7	25,7	26,2	24,8	26,3	25,2	23,6
	tGWL	16,9	18,2	18,9	20,2	21,1	21,1	27,9	30,7	31,9	31,7	30,5	30,6	28,8	26,8	28,2	28,0	24,4
	total	59,7	57,9	58,0	58,7	58,7	57,9	59,7	61,6	62,7	60,8	58,2	56,3	54,9	51,5	54,5	53,2	48,0
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe	OGWL	18,0	18,9	21,6	21,6	21,5	20,4	20,5	20,0	19,7	18,8	18,1	18,0	16,6	18,1	14,5	15,2	15,4
	tGWL	20,1	20,3	20,8	20,1	19,3	16,8	16,3	15,0	14,1	14,4	13,4	13,1	13,0	12,4	12,4	11,0	11,0
	total	38,1	39,2	42,5	41,7	40,7	37,2	36,8	35,0	33,8	33,0	31,5	31,1	29,8	31,1	26,9	27,6	26,4
landwirtschaftliche Beregnung *)	OGWL	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,3	1,5	1,6	1,3
Gesamtentnahmen		99,1	98,5	101,8	101,7	100,7	96,4	97,8	96,0	97,9	96,2	91,0	88,6	85,8	85,5	82,9	82,3	75,7

*) geschätzt **) von WVU erhoben, teilweise geschätzt

Abb. 4.36: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Baden-Württemberg



Die Grundwasserentnahmen im **hessischen Teilgebiet** (Tab. 4.7 und Abb. 4.37) werden überwiegend für die öffentlichen Trinkwasserversorgung benötigt. Die Entnahmen nahmen im Untersuchungszeitraum von 1983 bis 1989 zu und wurden von 1990 bis 1998 wieder verringert. Die hessische Wasserbedarfsprognose geht nicht von der Fortschreibung der

Entwicklungstendenzen vergangener Jahre aus, sondern beruht auf einer verbraucherspezifischen Analyse des Wasserbedarfs, getrennt nach Haushalten, Kleingewerbe und sonstigen Verbrauchern, der Abgabe an die Industrie, des Eigenbedarfs, der Verluste und einer intensivierte Anwendung wassersparender Beregnungstechniken und verbesserter Beregnungssteuerung in der Landwirtschaft. In der Prognose 2010 geht man trotz einer steigenden Einwohnerzahl von einer weiteren Entnahmereduzierung unter 20 Mio. m³/a aus. Größere Grundwassermengen stehen zur Verfügung, wenn mindestens eine ebenso große Menge an gereinigtem Rheinwasser infiltriert werden kann.

Die von der Industrie verbrauchte Grundwassermenge konnte durch teilweisen Ersatz durch Oberflächenwasser und Verbrauchsverringerung reduziert werden und liegt in den letzten Jahren bei 0,5 Mio. m³/a. Es wird für die Prognose 2010 von keiner weiteren Verringerung ausgegangen.

In dem Diagramm (Abb. 4.37) fällt auf, dass in den Jahren vor 1982 die Brauchwasserentnahme um ca. 3 Mio. m³/a höher war als in den späteren Jahren und die Trinkwasserentnahme um den gleichen Betrag niedriger war. Damals ist ein Teil des Trinkwassers der Brauchwasserversorgung zugerechnet worden.

Die tatsächlich entnommenen Grundwassermengen für die landwirtschaftliche Beregnung aus einer Vielzahl von Einzelbrunnen kann nicht registriert werden, weshalb aus dem Beregnungsbedarf und der Flächenutzung eine durchschnittliche Menge von 5,1 Mio. m³/a ermittelt wurde. Darin sind zahlreiche Einzelbrunnen der Beregnungs- und Bodenverbände in Lampertheim und Viernheim, deren Entnahmen sich im Mittel bei 1,5 Mio. m³/a bewegen, enthalten. Das Wasser aus den Beregnungsbrunnen in Lampertheim wird zu einem Teil aus der teilortsfesten Beregnungsanlage des Wasserverbandes Hessisches Ried genutzt; die mittlere jährliche Entnahme aus diesen Brunnen beträgt ca. 1,5 Mio. m³/a. Mit Hilfe weitergehender Optimierungsverfahren und die Benutzung von gereinigtem Oberflächenwasser für die Beregnung soll der Grundwasserverbrauch verringert werden.

Das Ziel der Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried [1] ist eine teilweise Erhöhung der Grundwasserstände auf ein natürliches Niveau, was durch eine Verringerung der Entnahmen, Optimierung des Leitungsverbundes, dynamische Steuerung der Grundwasserentnahmen in Verbindung mit einer gleichzeitigen Versickerung von aufbereitetem Rheinwasser sowie durch intensivierte Anwendung wassersparender Beregnungstechniken und verbesserte Beregnungssteuerung in der Landwirtschaft erreicht werden soll. In der Prognose 2010 ist eine Stufe I vorgesehen, in der darauf folgenden Stufe II sollen Waldgebiete weitgehend wieder Grundwasseranschluss bekommen.

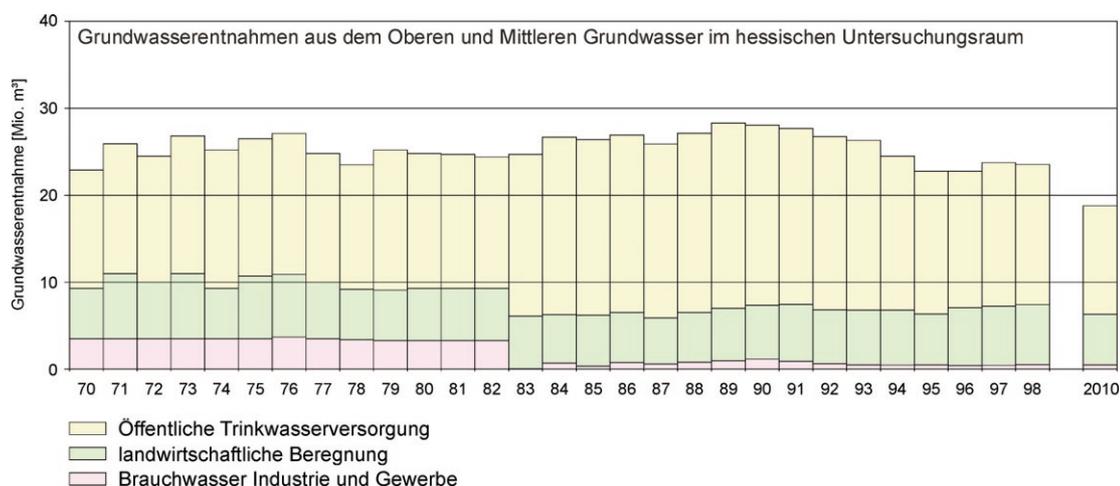
Tab. 4.7: Grundwasserentnahmen [Mio.m³] im Teilgebiet Hessen
Übersicht 1970 bis 1982 aus HGK 1987, Fortschreibung 1983 bis 1998

Jahr	GW-Liefer	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
öffentliche Trinkwasserversorgung	OGWL+MGWL	13,6	14,9	14,5	15,8	15,9	15,8	16,2	14,8	14,3	16,1	15,5	15,4	15,1
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe ^{*)}	OGWL+MGWL	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,7	3,5	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3
Zentrale landwirtschaftliche Beregnung ^{*)}	OGWL+MGWL	5,8	7,5	6,5	7,5	5,8	7,2	7,2	6,5	5,8	5,8	6,0	6,0	6,0
Gesamtentnahmen		22,9	25,9	24,5	26,8	25,2	26,5	27,1	24,8	23,5	25,2	24,8	24,7	24,4

Jahr	GW-Liefer	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	Prognose 2010 ^{**)}
öffentliche Trinkwasserversorgung	OGWL+MGWL	18,6	20,4	20,2	20,4	20,0	20,6	21,3	20,7	20,2	19,9	19,5	17,7	16,4	15,7	16,5	16,1	12,5
Brauchwasser für Industrie und Gewerbe ^{*)}	OGWL+MGWL	0,65	0,7	0,35	0,78	0,61	0,81	0,98	1,17	0,92	0,64	0,49	0,48	0,5	0,43	0,44	0,52	0,5
Zentrale landwirtschaftliche Beregnung	OGWL+MGWL	0,96	0,48	0,75	0,64	0,18	0,61	0,93	1,09	1,45	1,09	1,22	1,22	0,75	1,54	1,7	1,82	0,7
diffuse Beregnungsentn. ^{*)}	OGWL	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Gesamtentnahmen		24,7	26,7	26,4	26,9	25,9	27,1	28,3	28,0	27,7	26,7	26,3	24,5	22,7	22,8	23,7	23,6	18,8

*) geschätzt **) von WVU erhoben, teilweise geschätzt

Abb. 4.37: Grundwasserentnahmen im Teilgebiet Hessen



5 GRUNDWASSERBESCHAFFENHEIT

5.1 Allgemeines

In Fortschreibung der beiden Vorgängerberichte zur „Hydrogeologischen Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum“, konnten durch umfangreiche Untersuchungen die Kenntnisse über die hydrochemische Beschaffenheit des Grundwassers vertieft und weiter differenziert werden. Die Verteilung einzelner Inhaltstoffe wurde aquiferbezogen in Form von Isolinienplänen dargestellt. Erstmals wurden die Daten umfassend statistisch ausgewertet.

Die Beschaffenheit eines Grundwassers wird von einer größeren Anzahl von Faktoren beeinflusst. Zu den wichtigsten gehören:

- Die Beschaffenheit des Niederschlags und infiltrierender oberirdischer Gewässer
- Die Beschaffenheit von Randzuströmen sowie auf- oder absteigender Grundwässer anderer Grundwasservorkommen
- Die Reaktionen im Untergrund mit den Bodengasen oder aufsteigenden Gasen und mit dem Kontaktgestein
- Reaktionen im Grundwasser (Herausbildung dynamischer Gleichgewichtszustände)
- Anthropogene Einträge

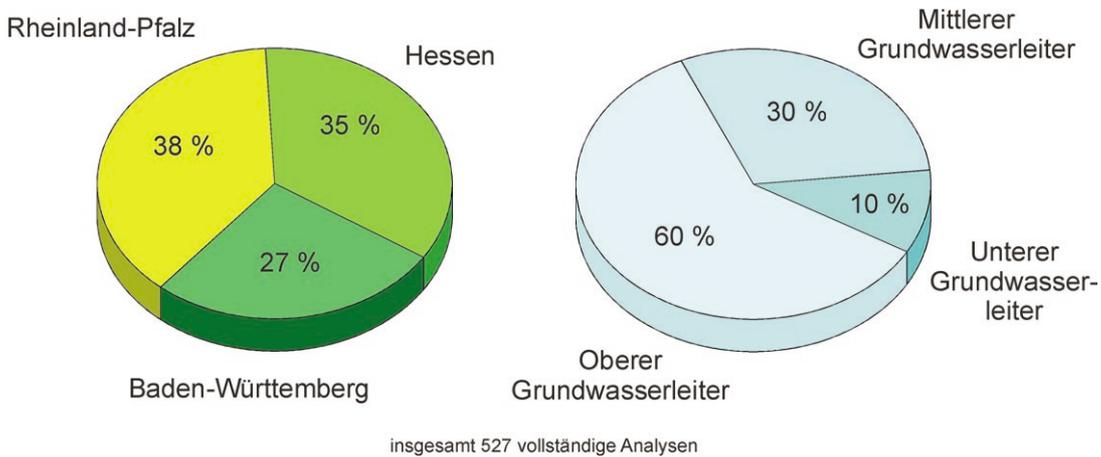
Die einzelnen Faktoren tragen zur Grundwasserbeschaffenheit in unterschiedlichen Maßen bei. Betroffen von den jeweiligen Faktoren sind meist nur einzelne Inhaltstoffe oder Stoffgruppen, die damit typisch sein können für bestimmte Reaktionen oder Prozesse in einem Grundwasservorkommen und die für diese Prozesse als Tracer dienen.

Im Untersuchungsraum sind besonders in den Industrie- und Gewerbegebieten eine Vielzahl von Altlasten und Grundwasserschadensfällen bekannt, die meist nur lokal zu einer Veränderung der hydrochemischen Zusammensetzung des Grundwassers geführt haben. Sehr häufig sind hierdurch organische Schadstoffe (z.B. LHKW) in das Grundwasser eingetragen worden. Diese anthropogenen Beeinträchtigungen können in vorliegender Kartierung nicht im Detail untersucht werden. Spezielle Untersuchungen im Rahmen von Sanierungen und Altlastenerkundungen werden seit mehreren Jahren durchgeführt.

5.2 Datengrundlage und Auswertemethodik

Für die vorliegende Bearbeitung wurden 527 vollständige und 581 unvollständige Grundwasseranalysen ausgewertet. Grundlage ist eine Sonderbeprobung vom Juni bis August 1994, ergänzt durch die routinemäßig erhobenen Messdaten der Landesgrundwassermessdienste und der verschiedenen Betreiber von Wasserversorgungsanlagen (Abb.5.1).

Abb. 5.1: Verteilung der 527 vollständigen Grundwasseranalysen aus Messstellen und Brunnen



Im Vergleich zu den Messkampagnen im Rahmen der vorangegangenen Untersuchungen wurde die Anzahl der beprobten Messstellen reduziert, da ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen repräsentative Messstellen ausgewählt werden konnten. Im Gegenzug wurde der betrachtete Parameterumfang erweitert.

Trotz dieser Vorauswahl ist die laterale Verteilung der Probenahmestellen heterogen. Eine erhöhte Datendichte findet sich im Nahbereich von Wassergewinnungsanlagen. Hier konnten die Betreiber umfangreiches Datenmaterial aus Vorfeldmessstellen und Brunnen zur Verfügung stellen.

Die Zuordnung der Grundwasserproben zu den verschiedenen Grundwasserstockwerken orientiert sich an den vorliegenden geologischen Untergrundaufschlüssen unter Berücksichtigung des technischen Ausbaus der Messstellen und Brunnen. So wurde der UGWL nur in Rheinland-Pfalz beprobt, da er wegen seiner relativen Hoehlage als tiefes Grundwasserstockwerk nur linksrheinisch von einer größeren Anzahl von Messstellen erschlossen wird. Im MGWL war eine tiefen-differenzierte Probenahme nicht möglich, weil die Verfiltrungen der Brunnen und Grundwassermessstellen in den meisten Fällen über die Grenzen der Teilstockwerke (Kap. 3.3.1) hinweggehen. Signifikante hydrochemische Unterschiede zwischen einzelnen Horizonten im MGWL sind daher auch nicht nachweisbar. Eine Übersicht über die Verteilung der Proben auf die verschiedenen Grundwasserstockwerke und die analysierten Parameter gibt Tabelle 5.1.

Tab. 5.1: Anzahl und Verteilung der ausgewerteten Grundwasserproben in den Grundwasserstockwerken und Übersicht der analysierten Parameter

Parametergruppe Grundwasserleiter	summarische Parameter	Hauptinhaltsstoffe		anorganische Spurenstoffe	Organik		
		vollständig	unvollständig		PBSM	LHKW	PAK
OGWL	337	315	350	129	32	119	32
MGWL	180	161	179	59	41	58	41
UGWL	52	51	52	13	9	9	9
Summe	569	527	581	201	82	186	82

Vor der Auswertung wurden die Analysendaten auf sog. „Ausreißer“ geprüft. Auffällige Werte, deren Ursache nicht eindeutig geklärt werden konnte, sind zwar in Tabelle 5.1 enthalten; sie wurden jedoch bei den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

Die Daten wurden mittels einfacher und multivariater statistischer Verfahren (Korrelationsanalyse, Regressionsanalyse, Clusteranalyse, Diskriminanzanalyse) ausgewertet. Für die wichtigsten Inhaltsstoffe wurden die punktförmigen Informationen regionalisiert und die Verteilung im Grundwasser in Form von Konzentrationsbereichen dargestellt (Karten 12 und 13).

5.3 Beschaffenheit der Niederschläge und der oberirdischen Gewässer

Die Beschaffenheit der Niederschläge und der oberirdischen Gewässer beeinflusst durch die Grundwasserneubildung die Beschaffenheit im Oberen Grundwasserleiter (OGWL). Für einige Inhaltstoffe repräsentieren die Gehalte bei der Grundwasserneubildung Minimalkonzentrationen, die nicht unterschritten und als Vergleichsmaßstab für die Beurteilung anthropogener Einflüsse herangezogen werden können.

Zur Abschätzung des Einflusses der Niederschlagsbeschaffenheit auf das Grundwasser sind in der Tabelle 5.2 Mittelwerte täglicher Niederschlagsanalysen aus vier Messstationen aus dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland aufgelistet [9]. Für die mittlere Grundwasserneubildungsrate im Untersuchungsraum von 106 mm/a (Reihe 1961 bis 1993; vgl. Kap. 4.3.2.8) wurden ergänzend die resultierenden Konzentrationen im Sickerwasser berechnet. Die Abschätzung zeigt, dass Nitrat- und Sulfatkonzentrationen zwischen 15 und 32 mg/l allein durch atmosphärische Einträge bedingt sein können. Im baden-württembergischen Rheingebiet wurden in den Jahren 1990 bis 1995 mittlere Depositionsraten zwischen 46 (Freiland) und 86 kg/ha Nitrat (Wald) ermittelt, die Raten der Sulfatdepositionen lagen zwischen 19 und 58 kg/ha [10].

Tab. 5.2: **Mittelwerte täglicher Niederschlagsanalysen aus vier Messstationen (Zeitraum 1984 bis 1995). Niederschlagshöhen zwischen 584 mm/a und 1727 mm/a [9]; Daraus resultieren die möglichen Maximal-Konzentrationen im Sickerwasser für eine mittlere Grundwasserneubildung im Untersuchungsraum von 106 mm/a**

Parameter	Konzentrationen [mg/l]	Depositionen [mg/m ²]	Konzentrationen im Sickerwasser [mg/l]
Elektr. Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	18 – 35		
pH-Wert (H)	4,37 – 4,65	(22 – 39)	
Natrium	0,18 – 0,59	176 – 369	1,7 – 3,6
Kalium	0,02 – 0,16	74 – 164	0,1 – 0,2
Calcium	0,24 – 0,52	247 – 421	2,3 – 4,1
Magnesium	0,05 – 0,12	46 – 83	0,4 – 0,8
Chlorid	0,30 – 1,24	291 – 723	2,7 – 7,1
Sulfat	1,84 – 3,78	1746 – 3187	17 – 32
Nitrat	1,61 – 3,18	1570 – 2789	15 – 27

Die beiden Vorfluter Rhein und Neckar unterscheiden sich von der mittleren Beschaffenheit des Grundwassers im OGWL im wesentlichen durch die geringeren Gehalte an Hydrogenkarbonat, Sulfat und Calcium (Tab. 5.3). Die geringeren Calcium- und Hydrogenkarbonatkonzentrationen sind Folge des geringeren CO₂-Partialdrucks der Luft (= 0,0003 bar), mit der die oberirdischen Gewässer in Kontakt stehen. Im Vergleich dazu liegt der CO₂-Partialdruck der Bodenluft, der für das Grundwasser maßgeblich ist, bei ca. 0,01 bis 0,05 bar. Im Grundwasser sind Sulfatkonzentrationen im wesentlichen durch randliche unterirdische Zuflüsse aus gips- und anhydrithaltigen Festgesteinen erhöht.

Die Chloridfrachten des Rheins, die früher zu hohen Chloridkonzentrationen im Gewässer geführt haben, waren rückläufig (Rückgang zwischen 1984 und 1993 von 155 kg/s auf 93 kg/s) und sind seit 1993 etwa konstant. Auch die Stickstofffracht beträgt seit Mitte der 70er Jahre unverändert 2 bis 2,5 kg/s. Im Neckar schwankte die mittlere Chloridfracht im Zeitraum 1977 und 1993 etwa zwischen 12 und 17 kg/s und ging seitdem auf 7 kg/s zurück. Die Stickstofffracht lag in diesem Zeitraum unter 1 kg/s.

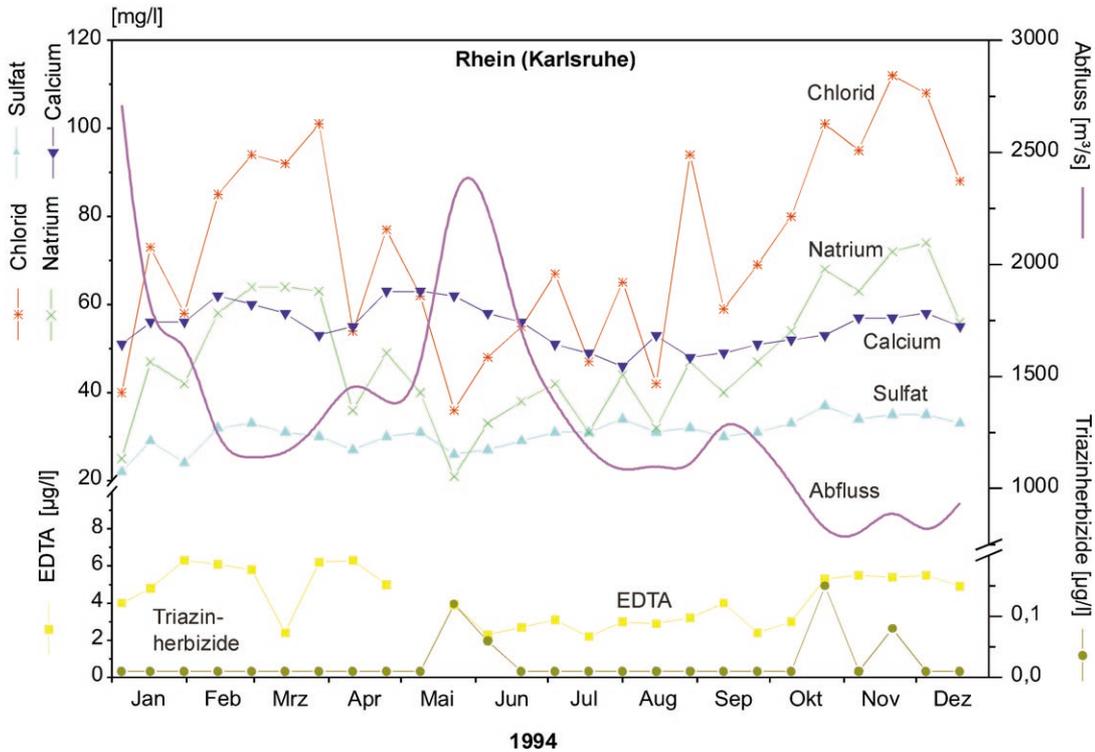
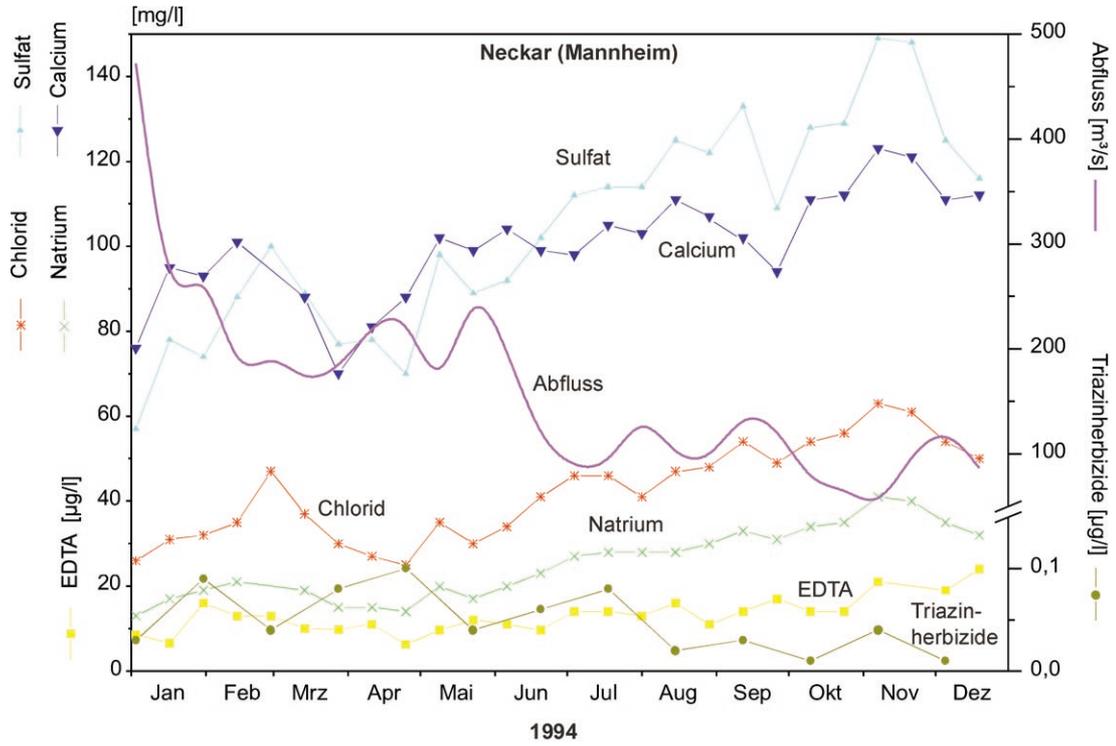
Tab. 5.3: **Mediane Beschaffenheit des Rheins (Station Karlsruhe) und des Neckars (Station Mannheim) im Jahr 1994; Messwerte aus [11]; zum Vergleich: mediane Beschaffenheit des Grundwassers im OGWL; alle Angaben in mg/l**

Parameter	Rhein	Neckar	OGWL
Natrium	47	27	24
Kalium	4,1	5,7	2,9
Calcium	55,5	102	159
Magnesium	7,3	19	19
Chlorid	71	43,5	55
Sulfat	31	106	129
Hydrogenkarbonat	(170)*	(255)*	344
Nitrat	7,5	22	12,4

* nicht analytisch bestimmt, aus der Ionenbilanz berechnet

Die chemischen Unterschiede zwischen dem Grundwasser und den oberirdischen Gewässern Rhein und Neckar sind angesichts der Variationsbreite der Konzentrationen im OGWL bei keinem einzelnen der aufgeführten Parameter so groß, dass man damit den Uferfiltrateinfluss bzw. -anteil zweifelsfrei nachweisen kann. Trotz dieser Einschränkung können sich lokal in Abhängigkeit vom jeweiligen hydrochemischen Hintergrund bestimmte Inhaltstoffe zum Nachweis von Uferfiltrat eignen. Als weitere Tracer für Uferfiltrat sind auch die Isotope des Wassers (im Neckar Tritium, im Rhein ¹⁸O) sowie Spurenstoffe wie Bor von Nutzen. Gelegentlich treten im Rhein und Neckar auch erhöhte Konzentrationen von organischen Spurenstoffen wie Pflanzenschutzmittel und EDTA (im Neckar 1994: 6,3-24 µg/l) auf. Auch der Vergleich der Konzentrationsschwankungen im Grundwasser und in den oberirdischen Gewässern kann ergänzend als Indiz für Uferfiltrat herangezogen werden (Abb. 5.2).

Abb. 5.2: Zeitreihen ausgewählter Inhaltstoffe in Rhein und Neckar im Jahr 1994. Messwerte aus [11]



Eine weitere Möglichkeit zur Identifikation des Gewässereinflusses bietet die multivariate Statistik. Hier wurde die hierarchische Clusteranalyse verwendet, mit deren Hilfe sich beiderseits des Rheins bis in ca. 350 m Entfernung uferfiltratbeeinflusste Bereiche hydrochemisch sicher belegen lassen, sofern die Filterstrecken der Messstellen nicht tiefer als 10 m unter GOK liegen (Verhältnisse bei Mittelwasserbedingungen). Auf der vom Rhein allseits umströmten Ketscher Rheininsel sind diese Einflüsse auch in 500 m Entfernung noch erkennbar. In einzelnen Messstellen kann ein Rheinuferfiltratanteil bis in eine Entfernung von maximal 1.100 m nicht ausgeschlossen werden. Dies betrifft u.a. das linksrheinische obere Grundwasser im Bereich Ludwigshafen-Frankenthal (die sog. „Frankenthaler Depression“).

Beim Neckar findet aufgrund der hydraulischen Situation eine Infiltration und ein Uferfiltratabstrom bevorzugt nach Norden statt, der sich bis in eine Entfernung von 430 m hydrochemisch nachweisen lässt. Im Süden ist der Einfluss der Neckars nur bis 130 m zu belegen. In einer Messstelle in rd. 230 m Entfernung ist der Einfluss hier nicht mehr feststellbar.

Bei Grundwasserentnahmen aus dem OGWL in der Nähe der Vorfluter können die Uferfiltratanteile stark zunehmen und die damit verbundenen hydrochemischen Veränderungen noch wesentlich deutlicher hervortreten.

5.4 Allgemeine chemische Charakteristik des Grundwassers

Für eine allgemeine chemische Charakterisierung der Grundwässer wurden für die verschiedenen Inhaltstoffe, getrennt für die Grundwasserstockwerke OGWL, MGWL und UGWL, die statistischen Maßzahlen arithmetischer Mittelwert, Minimum, Maximum, Standardabweichung, Varianz sowie die Perzentilwerte berechnet (Tab. 5.4). Die anorganischen und organischen Spurenstoffe sind gesondert dargestellt (Tab. 5.8).

Grafisch sind die Ergebnisse dieser Auswertung für die wichtigsten Inhaltstoffe in Form von Box-Plots dargestellt (Abb. 5.3 und 5.4). Die Beziehungen der Hauptinhaltsstoffe zueinander können anhand der Piper-Diagramme (Abb. 5.5) beurteilt werden.

Die in der Tabelle 5.4 aufgeführten Parameter (zuzüglich Eisen, Mangan und Phosphat aus Tab. 5.8) zeigen in den drei untersuchten Stockwerken signifikante Unterschiede der Grundwasserbeschaffenheit auf. Die eigenständigen hydrochemischen Charaktere der drei Grundwasserstockwerke lassen sich mittels Diskriminanzanalyse statistisch nachweisen (Tab. 5.5).

Die Grundwässer im OGWL sind durch hohe Gesamtlösungsinhalte (angezeigt durch hohe elektrische Leitfähigkeiten, Tab. 5.4) sowie eine große chemische Variationsbreite (Abb. 5.3 bis 5.5) charakterisiert. Bei den Kationen dominiert Calcium mit Anteilen größer als 50 mmol(eq)%, bei den Anionen herrscht eine große Vielfalt. Neben hohen Hydrogenkarbonat-Konzentrationen treten hohe Chlorid-, Sulfat- und Nitratkonzentrationen auf.

Im MGWL ist der Gesamtlösungsinhalt und auch die hydrochemische Variationsbreite deutlich geringer. Die Calcium-Dominanz besteht weiterhin, die Magnesiumanteile liegen generell unter 35 mmol(eq)%. Andererseits deuten sich bei einigen wenigen Analysen erhöhte

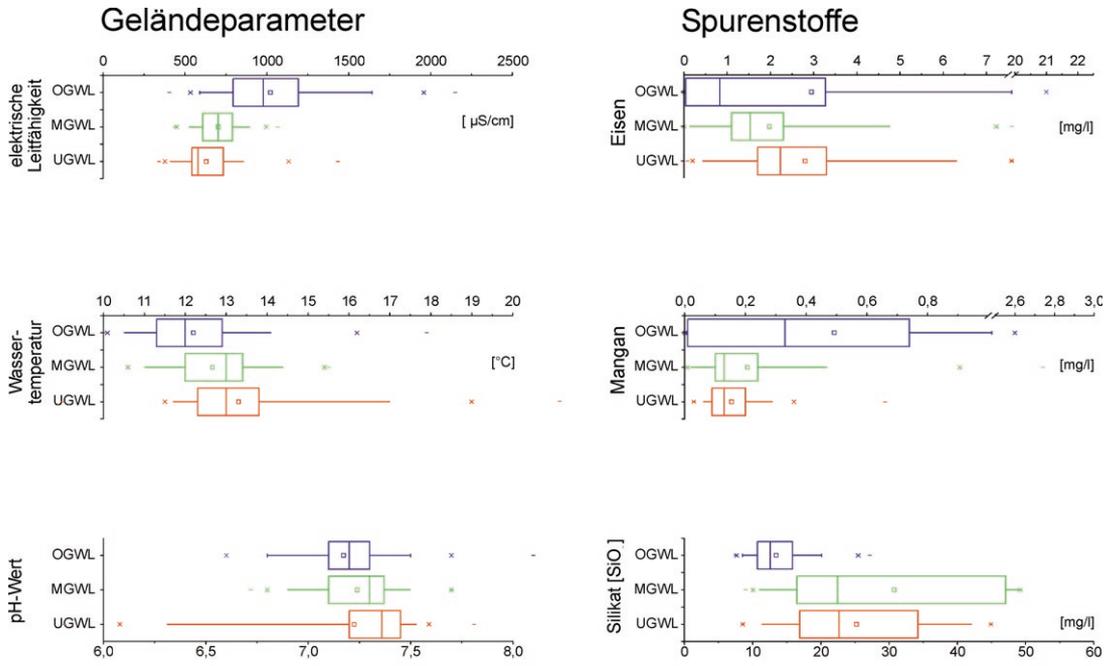
Natrium-Anteile an, eine Tendenz, die sich zum UGWL weiter verstärkt. Bei den Anionen sind die Hydrogenkarbonat-Anteile mit Werten von meist über 50 mmol(eq)%, z.T. über 75 mmol(eq)% am größten.

Die Gesamtkonzentration nimmt im UGWL im Vergleich zum MGWL nochmals geringfügig ab. Bei den Kationen überwiegen nach wie vor die Calcium-Anteile; einige Analysen weisen jedoch hohe Natrium-Anteile auf. Bei den Anionen besitzen nahezu alle Analysen Hydrogenkarbonat-Dominanz mit Anteilen größer als 75 mmol(eq)%.

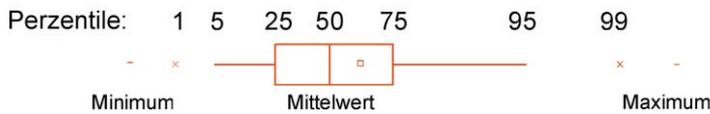
Tab. 5.4: **Statistische Maßzahlen der ausgewerteten Grundwasseranalysen im Rhein-Neckar-Raum. Der Median entspricht dem 50%-Perzentilwert. Soweit nicht gesondert vermerkt, alle Zahlenangaben in mg/l.**

Parameter	Grundwasserleiter	Anzahl der Proben	Minimum	Mittelwert	Maximum	Perzentile			Varianz	Standardabweichung
						10%	Median	90%		
Wassertemperatur [°C]	OGWL	222	10	12,2	17,9	10,9	12	13,7	1,4	1,2
	MGWL	122	10,6	12,7	15,5	11,1	13	13,9	2,2	1,5
	UGWL	52	9	13,3	20,8	11,8	13	16,2	3,7	1,9
Sauerstoff	OGWL	150	nn	2,5	9,9	0,1	1,4	6,8	7	2,6
	MGWL	110	nn	1	7,4	0,1	0,3	2,2	1,4	1,2
	UGWL	44	nn	0,7	4,9	0,1	0,3	1,6	1	1
pH-Wert	OGWL	233	4,2	7,2	8,1	6,9	7,2	7,4	0,09	0,3
	MGWL	133	6,7	7,2	7,7	6	7,3	7,5	0,04	0,2
	UGWL	52	5,8	7,2	7,8	6,4	7,4	7,5	0,17	0,4
Elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]	OGWL	336	44,5	734	2.330	100	730	1.406	247.130	497
	MGWL	180	41	570	1.030	377	578	765	32.920	181
	UGWL	52	160	505	1.470	258	446	760	48.661	221
Natrium	OGWL	340	1,9	29,4	180	8,5	24	55,9	494	22,2
	MGWL	179	3,7	13,2	56	6	10,1	16	83,3	9,1
	UGWL	52	4,2	23,8	78	5,8	19,8	52,1	313	17,7
Kalium	OGWL	340	0,2	6,4	190	1,3	2,9	11,4	189	13,7
	MGWL	177	0,8	2,1	22	1,2	1,7	3	3	1,7
	UGWL	52	1,2	3,2	8,9	2	3	5,3	1,8	1,3
Calcium	OGWL	349	28	165	427	96,4	159	244	3.801	61,7
	MGWL	179	40	101	302	74	101	126	762	27,6
	UGWL	52	12,4	68,6	194	27,9	62	113	1.120	33,5
Magnesium	OGWL	349	3,4	21	104	7,8	19	34	148	12,1
	MGWL	179	2,7	15,6	81	8,3	15	23	55,9	7,5
	UGWL	52	2,5	9,7	30	5,3	7,7	18,4	30,7	5,5
Hydrogenkarbonat	OGWL	329	89	350	665	229	344	476	9.459	97,3
	MGWL	174	122	351	677	264	355	428	4.911	70
	UGWL	52	35	269	439	115	246	411	10.144	101
Chlorid	OGWL	345	1,4	65,1	600	17	55	122	2.772	52,7
	MGWL	176	2,2	17	124	4,5	10,6	32	376	19,4
	UGWL	52	3	27,3	271	6,3	12,1	62	2.023	45
Sulfat	OGWL	345	2,1	160	708	50,8	129	307	12.750	113
	MGWL	166	1,7	43,8	879	4,7	30,7	93,3	5.510	74,3
	UGWL	52	nn	15,5	104	1,1	11,3	38,4	328	18,1
Nitrat	OGWL	293	nn	34	549	nn	12,4	96,2	3.362	58
	MGWL	107	nn	1,3	24,9	nn	nn	2,8	8,3	2,9
	UGWL	52	nn	nn	14,3	nn	nn	nn	—	—

Abb. 5.3: **Box-Plots der wichtigsten Geländeparameter und Spurenstoffe, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter**



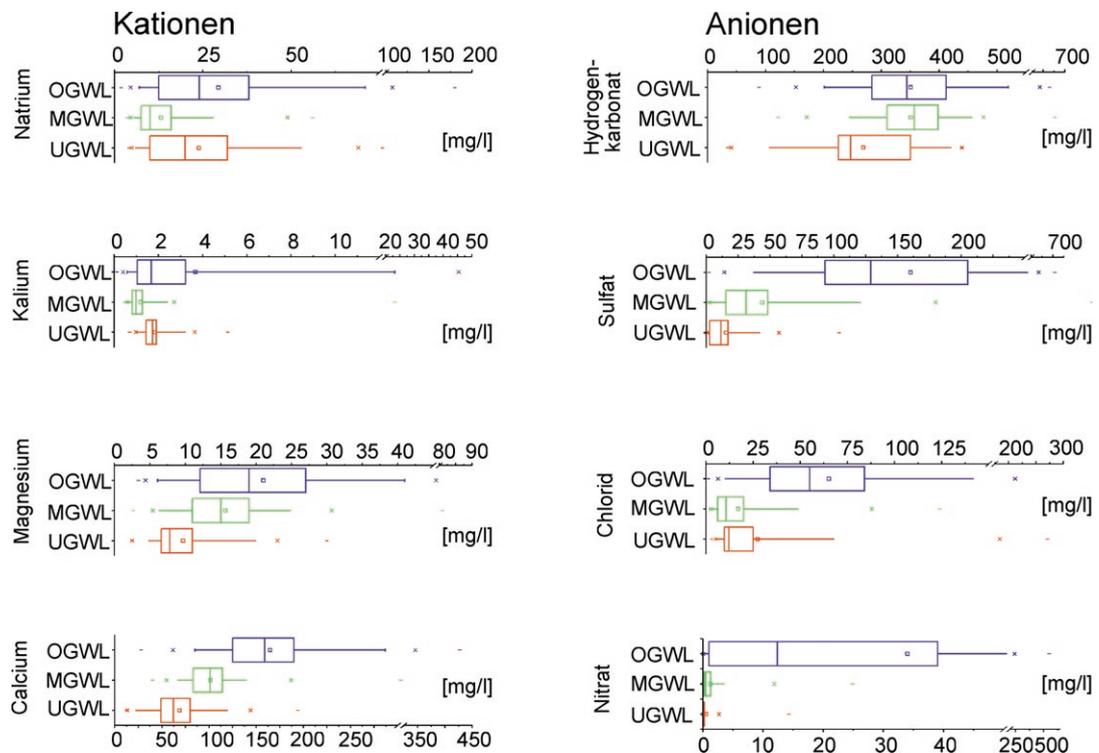
Legende



Tab. 5.5: **Überprüfung der Zugehörigkeit der Grundwässer in den Messstellen zu den verschiedenen Grundwasserleitern mittels Diskriminanzanalyse: beobachtete Zuordnung aufgrund der Lage der Filterstrecken und statistisch berechnete Einstufung (Gruppierung) mittels der Hauptinhaltsstoffe und Geländeparameter. Insgesamt errechnet sich eine korrekte statistische Zuordnung von 78,4%.**

Beobachtete Gruppe	Anzahl Fälle	berechnete Gruppenzugehörigkeit					
		1		2		3	
OGWL	178	136	76,4%	20	11,2%	22	12,4%
MGWL	95	4	4,2%	77	81,1%	14	14,7%
UGWL	51	1	2,0%	9	17,6%	41	80,4%

Abb. 5.4: **Box-Plots der wichtigsten Kationen und Anionen, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter**

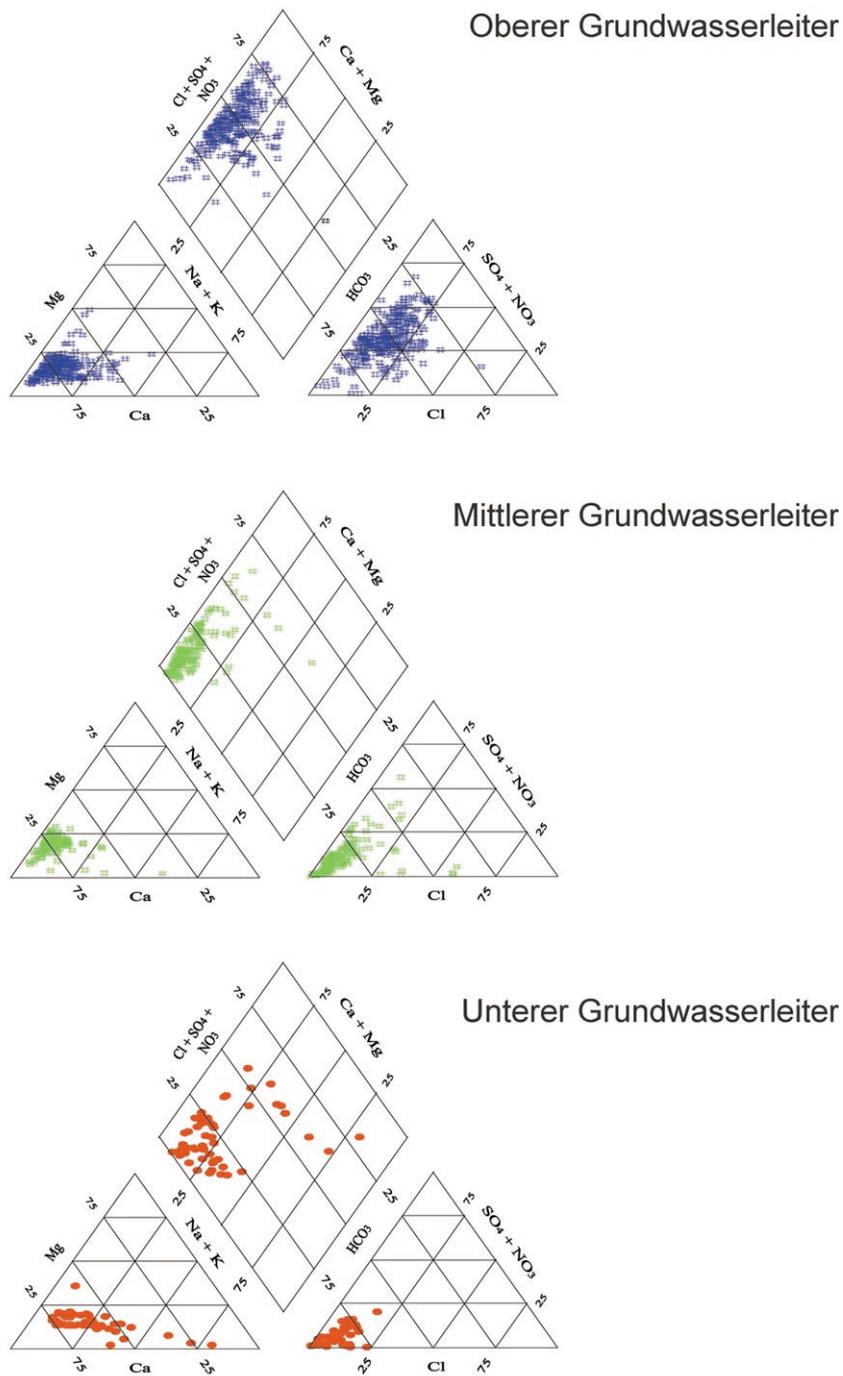


Teufenbezogen zeigen die verschiedenen Inhaltstoffe und physikochemischen Parameter unterschiedliche Veränderungen (Tab. 5.4 sowie Abb. 5.3 und 5.4):

- ansteigende Werte mit zunehmender Tiefe: Wassertemperatur, pH
- abnehmende Werte mit zunehmender Tiefe: Sauerstoff, elektr. Leitfähigkeit, Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Sulfat, Nitrat
- größte Werte im OGWL, niedrigste Werte im MGWL und mittlere Werte im UGWL: Natrium, Kalium, Chlorid

Diese Entwicklungen lassen Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Parametern erkennen, die durch Korrelationsrechnungen überprüft wurden.

Abb. 5.5: Piper-Diagramme der Grundwasseranalysen, getrennt für die verschiedenen Grundwasserleiter



5.4.1 Elektrische Leitfähigkeit (Karten 12a und 13a)

Die elektrische Leitfähigkeit (in $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 25°C) erfasst die im Wasser vorliegenden Ionen und ist ein Maß für die Mineralisation eines Grundwassers. Im Kartiergebiet werden erhöhte Leitfähigkeiten im Wesentlichen durch hohe Calcium- und Sulfatgehalte hervorgerufen. Der Median für die elektrische Leitfähigkeit beträgt im OGWL $730 \mu\text{S}/\text{cm}$ und nimmt mit zunehmender Tiefe auf $578 \mu\text{S}/\text{cm}$ im MGWL und $446 \mu\text{S}/\text{cm}$ im UGWL ab (Tab. 5.4).

In der regionalen Verteilung können im OGWL unterschieden werden (Karte 12a):

- Gebiete mit geringer elektrischer Leitfähigkeit ($<750 \mu\text{S}/\text{cm}$). Es handelt sich um ausgedehnte Waldgebiete im Südosten (Schwetzinger Hardt) und Nordosten (Bürstädter Wald) mit geringen anthropogenen Einträgen, sowie Gebiete in der Umgebung des Neckars und des Speyerbachschwemmfächers, in denen das höher konzentrierte Grundwasser durch geringer mineralisiertes Oberflächenwasser verdünnt wird.
- Gebiete mit mittlerer elektrischer Leitfähigkeit ($750-1500 \mu\text{S}/\text{cm}$). Diese Werte sind charakteristisch für Gebiete, in denen das Grundwasser deutlich durch Landwirtschaft, Verkehr und Besiedlung beeinflusst wird.
- Gebiete mit hoher elektrischer Leitfähigkeit ($>1500 \mu\text{S}/\text{cm}$). Werte über $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ finden sich in den Randbereichen nordwestlich Frankenthal. Sie sind bedingt durch einen höher mineralisierten Randzustrom bzw. sind als lokale Anomalien infolge anthropogener Stoffeinträge aufzufassen.

Im MGWL ist die elektrische Leitfähigkeit wenig differenziert und liegt zwischen 400 und $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Karte 13a). Bereichsweise spiegelt sich die Leitfähigkeitsverteilung des OGWL in abgeschwächter Intensität wider und belegt bereits fortgeschrittene Veränderungen durch Zuflüsse aus dem OGWL. Beginnende Beeinflussungen durch zufließendes Grundwasser aus dem OGWL sind an einer Verschiebung der Ionenverhältnisse von Hydrogenkarbonat hin zu Sulfat erkennbar [12]. Im Südwesten macht sich der Zustrom von geringmineralisierten Buntsandsteinwässern bemerkbar.

5.4.2 Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat und pH-Wert

Wichtigster Prozess für die Mineralisation des weichen Niederschlagswassers nach dessen Infiltration in den Untergrund ist die Lösung von Karbonaten aus dem Kontaktgestein, die im Grundwasserleiter in Form von Kalkstein- und Dolomitsteingeröllen unterhalb der entkalkten Verwitterungszone vorkommen. Die Fähigkeit zur Karbonatlösung wird durch die Aufnahme von CO_2 aus der Bodenluft, das dort als Folge der biologischen Aktivität angereichert ist, erhöht. Der Lösungsprozess endet mit Erreichen der Kalk- bzw. Dolomitsättigung (Kalk-Kohlensäuregleichgewicht).

Als Folge der Karbonatlösung steigen die Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat an, gleichzeitig nimmt der pH-Wert zu. Die resultierenden medianen Konzentrationen betragen für den OGWL für Calcium $159 \text{ mg}/\text{l}$, für Magnesium $19 \text{ mg}/\text{l}$ und für Hydrogenkarbonat $344 \text{ mg}/\text{l}$. Der pH-Wert liegt mit $7,2$ im neutralen Bereich.

Im Vergleich zum OGWL nehmen die Calcium- und Magnesiumgehalte in den tieferen Stockwerken sukzessive ab, während die Hydrogenkarbonatkonzentration weitgehend konstant bleibt (MGWL) bzw. nur leicht zurückgeht (UGWL; Tab. 5.4). Eine derartige Veränderung im

Chemismus ist typisch für Ionenaustauschprozesse, bei denen Erdalkalitionen aus dem Grundwasser an die Austauscher (z.B. Tonminerale) der grundwasserleitenden Gesteine gebunden werden, umgekehrt dafür Alkaliionen in Lösung gehen. Untergeordnet kann zu dieser Entwicklung auch die Silikatverwitterung durch bevorzugte Lieferung von Alkalien beitragen.

5.4.3 Sulfat (Karten 12b und 13b)

Sulfatgehalte geogener Herkunft lassen sich auf die Auflösung schwefelhaltiger Gesteine (z.B. Gips) im Untergrund zurückführen. Solche Gesteine finden sich vor allem in der Vorbergzone und in der nordwestlich zum Mainzer Becken anschließenden Zwischenscholle. Im Verbreitungsgebiet der Hochflutlehme (Karte 14) kann zudem die Oxidation von Sulfidschwefel zu hohen Sulfatgehalten beitragen. Anthropogene Sulfatquellen sind z.B. atmosphärischer Eintrag, Bauschuttdeponien und Düngemittel. Anhand der Schwefel- und Sauerstoffisotopenverteilung im Sulfat lassen sich Sulfate anthropogener Herkunft identifizieren [17]. Die Sulfatkonzentrationen werden allerdings nicht nur durch die Verfügbarkeit von Schwefel sondern auch durch die Redox-Verhältnisse beeinflusst. Im OGWL (Karte 12b) überdecken die Sulfatgehalte einen großen Konzentrationsbereich zwischen 2,1 und 708 mg/l bei einem Median von 129 mg/l. Konzentrationen deutlich kleiner als der atmosphärische Eintrag (17-32 mg/l; Kap. 5.3) dürften Folge einer mikrobiellen Sulfatreduktion sein, während höhere Konzentrationen auf einen zusätzlichen geogenen oder anthropogenen Sulfateintrag hinweisen.

Besonders hohe Sulfatgehalte treten in landwirtschaftlich intensiv genutzten Bereichen und Siedlungsgebieten auf. Niedrige Gehalte findet man in bewaldeten Gebieten mit sandigem Untergrund sowie im Infiltrationsbereich von oberirdischen Gewässern (Speyerbach-Schwemmfächer, Waldgebiet Schwetzinger Hardt). Im MGWL (Karte 13b) und UGWL liegen die Sulfatkonzentrationen deutlich niedriger als im OGWL. Die Medianwerte betragen 31 bzw. 11 mg/l, ein Hinweis auf primär geringere Sulfatkonzentrationen bzw. eine fortschreitende mikrobielle Sulfatreduktion. Es ist zu erwarten, dass bei hohen mittleren Verweilzeiten (>10.000 a) die Grundwässer sulfatfrei oder zumindest sulfatarm (<10 mg/l) sind. Treten in solchen Wässern trotzdem höhere Sulfatgehalte auf, ist dies ein Indiz für Mischungsprozesse zwischen einer alten sulfatfreien und einer jungen sulfatreichen Komponente.

5.4.4 Redox-Verhältnisse, Eisen und Mangan

Die Redox-Verhältnisse im Grundwasser sind das Ergebnis elektrochemischer Reaktionen. Von besonderer Bedeutung für das Redox-Milieu ist das Vorkommen von gelöstem Sauerstoff und organischem Kohlenstoff. Die Sauerstoffgehalte schwanken im OGWL in einem großen Wertebereich zwischen nicht nachweisbar und 9,9 mg/l, d.h. es treten sowohl reduzierende als auch oxidierende Bedingungen auf. Die geringen Sauerstoffgehalte sind Folge einer Sauerstoffreduktion, gebunden an erhöhte Gehalte organischer Substanz im Gestein, wie z.B. im Bereich von Altarmen des Rheins, der Rheinaue oder der Kinzig-Murg-Rinne.

Die Konzentrationen von gelöstem zweiwertigem Eisen und Mangan werden weitgehend durch die Redox-Verhältnisse, aber auch durch den pH-Wert bestimmt. Hohe Konzentrationen findet man in sauren Wässern und bei reduzierenden Milieubedingungen. Entsprechend des regional stark schwankenden Redox-Milieus findet man im OGWL bereichsweise sowohl hohe als auch sehr niedrige Eisen- und Mangankonzentrationen.

In den tieferen Stockwerken nehmen die Sauerstoffgehalte systematisch ab, obwohl selbst noch im MGWL Sauerstoffgehalte von 7,4 mg/l und im UGWL von 4,9 mg/l festgestellt wurden. Derartige Befunde können Anzeichen für einen schnellen Zufluss von oberflächennahem sauerstoffreichem Grundwasser aus dem OGWL über Fensterbereiche in den MGWL und UGWL sein. Meistens sind sie jedoch Hinweise auf undichte Messstellen und Ringraumabdichtungen. In einigen Fällen kann auch die Möglichkeit einer Kontamination der Grundwasserprobe mit Luftsauerstoff nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

5.4.5 Natrium, Kalium und Chlorid (Karten 12c und 13c)

Die Alkalimetalle Natrium und Kalium sowie Chlorid gelangen über den atmosphärischen Eintrag in das Grundwasser, erhöhte Konzentrationen sind charakteristisch für anthropogene Einträge wie Düngung, Besiedlung (z.B. undichte Kanäle), Winterdienst auf Straßen, Deponien oder Altlasten. Vor allem die Kali-Düngung (Kalium-, Calcium- und Magnesiumchlorid), die immerhin 7,5 % der auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ausgebrachten Reinnährstoffe ausmacht [13], dürfte zu den hohen Chloridkonzentrationen im Grundwasser beitragen. Auch die Infiltration Natrium-, Kalium- und chloridhaltiger Oberflächengewässer kommt als Quelle für erhöhte Konzentrationen im Grundwasser in Frage. Schließlich können sehr hohe Natrium- und Chlorid-Konzentrationen durch den Aufstieg Natrium- und chloridhaltiger Tiefenwässer verursacht werden.

Für den OGWL wurden als Medianwerte für Natrium 24 mg/l, für Kalium 2,9 mg/l und für Chlorid 55 mg/l berechnet. Die atmogen eingetragenen Gehalte dürften in der Größenordnung der Minimalwerte liegen, für Natrium 1,9 mg/l, für Kalium 0,2 mg/l und für Chlorid 1,4 mg/l (Tab.5.4).

Regional betrachtet sind die Chloridgehalt im OGWL flächenhaft anthropogen erhöht, besonders ausgeprägt linksrheinisch unter landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen (Karte 12c). Niedrige Konzentrationen finden sich nur in ausgedehnten bewaldeten Gebieten im Südosten (Schwetzinger Hardt) und Nordosten (Bürstädter Wald, Käfertaler Wald).

Im MGWL sind die Natrium-, Kalium- und Chloridkonzentrationen im Vergleich zum OGWL und auch zum UGWL mit medianen Werten von 10 mg/l, 1,7 mg/l und 11 mg/l am geringsten. Einerseits fehlen hier weitgehend die massiven anthropogenen Beeinflussungen, die für den OGWL charakteristisch sind, andererseits machen sich die geogenen Prozesse, die im UGWL erhöhte Natrium-, Kalium- und Chloridkonzentrationen hervorrufen, noch nicht bemerkbar. Ausnahmen sind lokale Anomalien erhöhter Chloridgehalte im Raum Ludwighafen und Frankenthal, verursacht auch durch den Aufstieg natrium-chloridhaltiger Tiefenwässer als Folge der intensiven Bewirtschaftung des MGWL in diesem Gebiet (Karte 13c).

5.4.6 Nitrat (Karte 12d), Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel

Erhöhte Nitratkonzentrationen und das Auftreten von Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln (PBSM) im Oberen Grundwasser sind, von seltenen Ausnahmen abgesehen, auf eine intensive landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen.

Die medianen Nitratgehalte liegen im Kartiergebiet im OGWL bei 12,4 mg/l und schwanken zwischen nicht nachweisbar und 549 mg/l. Regional sind erhöhte Nitratgehalte in den Grabenrandbereichen zu beobachten, die von nitratreichen Zuflüssen von Westen bzw. Osten herrühren. Anomalien mit Maximalwerten über 300 mg/l finden sich in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und sandigen Böden mit geringem Rückhaltevermögen (Karte 12d). Anhand der isotopischen Zusammensetzung des Nitrats lässt sich seine überwiegende Herkunft aus Mineraldünger belegen, wohingegen Stalldünger nur untergeordnet als Nitratquelle beteiligt ist [14]. Die sehr niedrigen Konzentrationen, die lokal auftreten (z.B. in der Rheinaue), sind Folge der mikrobiellen Nitratreduktion.

Im MGWL und UGWL finden sich sehr geringe Nitratgehalte bzw. Nitrat ist nicht nachweisbar. Vermutlich war hier die Nitratbelastung primär schon gering und wurde zusätzlich durch mikrobiellen Nitratabbau weiter verringert. Nicht nachweisbare bzw. sehr geringe (wenige mg/l) Nitratkonzentrationen sind denn auch bei den gegebenen Verhältnissen für die tieferen Grundwasserstockwerke zu erwarten. Die lokal auftretenden höheren Werte (im MGWL bis 24,9 mg/l, im UGWL bis 14,3 mg/l) sind eher ein Hinweis auf undichte Messstellen oder Ringraumabdichtungen als auf die tatsächlichen Verhältnisse im Grundwasser.

201 Proben wurden auf PBSM untersucht, in 72 von ihnen, ausschließlich aus dem OGWL, traten positive Befunde auf. Nachgewiesen wurden meist mehrere Substanzen einer Stoffgruppe, vorwiegend Triazinherbizide, vereinzelt auch andere Wirksubstanzen (Tab. 5.6). Auffällig ist der trotz des langjährigen Anwendungsverbots nach wie vor hohe Anteil an Proben mit positiven Atrazin- und Desethylatrazin-Befunden, die entweder auf anhaltende, verbotswidrige Anwendung oder auf hohe Persistenz der Stoffe im Untergrund hinweisen. Eine regionale Häufung lässt sich nicht feststellen, vielmehr gibt es einzelne punktuelle Verunreinigungen.

Tab. 5.6: **Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel (PBSM) im OGWL**

Pflanzenbehandlungsmittel [$\mu\text{g/l}$]	Anzahl Proben	Anzahl positiver Befunde	Mittelwert positiver Befunde	Maximale Konzentration
Atrazin	193	34	0,043	0,22
Desethylatrazin	193	52	0,019	0,55
Desisopropylatrazin	186	14	0,133	0,60
Simazin	195	24	0,080	0,66
Propazin	196	17	0,126	0,52
Terbutylazin	191	8	0,049	0,10
Desisopropylterbutylazin	83	3	(0,0867)	0,10
Metolachlor	83	1		0,10
Metazachlor	83	25	0,035	0,05
Bromacil	83	33	0,219	3,20
Hexazinon	83	35	0,067	0,30
Metalaxyl	76	19	0,064	0,10
Summe PBSM	201	72	0,160	3,64

In den tieferen Grundwasserleitern konnten in allen 79 untersuchten Proben keine PBSM nachgewiesen werden.

5.4.7 Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im OGWL wurden 119 Analysen auf leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) untersucht, die z.T. in erheblichen Konzentrationen nachgewiesen wurden (Tab. 5.7). Als Einzelstoffe kommen überwiegend Trichlorethen (bis 14 µg/l) und Tetrachlorethen (bis 12,4 µg/l) vor, vereinzelt in geringen Konzentrationen auch 1,1,1-Trichlorethan (bis 0,4 µg/l). Die Befunde können bekannten Schadensfällen zugeordnet werden. Hinweise für einen flächenhaften Eintrag gibt es bisher nicht.

Zwei Einzelfunde von LHKW im MGWL (bei 58 untersuchten Proben) sind vermutlich auf undichte Messstellen oder Ringraumabdichtungen zurückzuführen, bei 9 untersuchten Proben im UGWL konnten keine LHKW nachgewiesen werden.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) wurden gemäß Trinkwasserverordnung (TrinkwV) an insgesamt 82 Proben untersucht, 32 davon stammen aus dem OGWL, 41 aus dem MGWL und 9 aus dem UGWL. Konzentrationen über der Nachweisgrenze wurden nicht festgestellt. Im OGWL sind jedoch Grundwasserschadensfälle mit PAK-Verunreinigungen bekannt.

Tab. 5.7: **Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe**

LHKW [µg/l]	Anzahl Proben	Anzahl* positiver Befunde	Mittelwert positiver Befunde	Maximale Konzentration
Trichlorethen	186	29	0,860	14,00
Tetrachlorethen	186	39	0,510	12,40
1,1,1-Trichlorethan	186	19	0,090	0,40
Dichlormethan	185	7	0,010	0,01
Tetrachlormethan	185	1		0,20
Trihalogenmethane	186	0		
			0,910	14,80

* in 51 Messstellen

5.4.8 Anorganische Spurenstoffe

Im Rahmen der Bearbeitung der Hydrogeologischen Kartierung wurde das Grundwasser auf eine Vielzahl von anorganischen Spurenstoffen untersucht. Dazu gehören Substanzen, die ausschließlich geogener Herkunft sind (z.B. Aluminium, Strontium, Barium) und solche, die auch anthropogen eingetragen sein können (z.B. Schwermetalle). Typisch für viele dieser Substanzen ist, dass ihre Konzentrationen vom pH-Wert und Redox-Potential abhängen und durch Lösungsgleichgewichte mit schwerlöslichen Verbindungen kontrolliert werden. Ihre chemische Mobilität ist überwiegend gering.

Für viele Substanzen, speziell für die Schwermetalle, konnten bei den meisten Analysen keine Gehalte über der Nachweisgrenze festgestellt werden (Tab. 5.8). Einzelne abweichende hohe Konzentrationen (z.B. Arsen) stellen lokale Besonderheiten dar und bedürfen gesonderten Untersuchungen.

Tab. 5.8: Umfang und Ergebnisse der Untersuchungen auf anorganische Spurenstoffe

Spurenstoffe [mg/l]	Grundwasserleiter	Anzahl Proben	Median (entspricht n.n.)	Anzahl der positiven	Mittelwert Befunde	Maximale Konzentration
Eisen	OGWL	212	0,82	179	2,95	24,6
	MGWL	132	1,5	129	1,98	17,9
	UGWL	52	2,22	52	2,8	10
Mangan	OGWL	219	0,33	163	0,6	3,2
	MGWL	132	0,13	126	0,21	2,7
	UGWL	52	0,13	52	0,15	0,66
Aluminium	OGWL	56	(0,005)	52	0,01	0,07
	MGWL	53	(0,005)	14	6,5	0,6
	UGWL					
Strontium	OGWL	40	0,369	40	1	0,16
	MGWL	43	0,42	43	1	1,15
	UGWL	5	0,26	5	0	0,56
Barium	OGWL	58	0,089	58	0,1	0,62
	MGWL	90	0,14	75	0,16	0,64
	UGWL	24	0,27	24	0,29	0,57
Phosphat	OGWL	183	(0,03)	49	0,48	4,5
	MGWL	101	0,18	72	0,38	0,89
	UGWL	51	0,17	42	0,48	1,4
Arsen	OGWL	112	0,002	112	0,02	0,86
	MGWL	96	(0,001)	16	0,002	0,052
	UGWL	36	(0,0005)	31	0,002	0,036
Cadmium	OGWL	77	0,00015	77	0,0005	0,013
	MGWL	58	(0,00005)	3		0,0005
	UGWL	36	(0,00025)	2		0,0003
Blei	OGWL	77	(0,0002)	2		0,012
	MGWL	58	(0,0002)	2		0,003
	UGWL	36	(0,0002)	3		0,003
Bor	OGWL	166	0,04	135	0,09	0,59
	MGWL	105	0,03	33	0,05	0,64
	UGWL	39	0,02	22	0,05	0,21
Chrom	OGWL	76	(0,0001)	9	0,003	0,009
	MGWL	57	(0,0002)	1		0,003
	UGWL	36	(0,0003)	0		
Kupfer	OGWL	72	(0,001)	22	0,005	0,015
	MGWL	22	(0,001)	3		0,006
	UGWL	16	(0,001)	1		0,002
Nickel	OGWL	78	(0,0025)	11	0,01	0,02
	MGWL	58	(0,0025)	3		0,05
	UGWL	36	(0,0025)	0		
Zink ¹⁾	OGWL	71	(0,075)	25	0,27	2,8
	MGWL	24	(0,012)	15	0,16	1,6
	UGWL	16	(0,006)	5	0,2	1,5

¹⁾Dieser Parameter kann sehr stark vom Ausbaumaterial (verzinkte Stahlrohre) beeinflusst sein

5.4.9 Kohlenstoff-14 und Tritium (Karte 13d)

Zur Ermittlung der Aufenthaltszeit der Grundwässer im Untergrund wurden Tritiumkonzentrationen und die Kohlenstoff-14-Isotopengehalte bestimmt.

Tritium (^3H), das radioaktive Isotop des Wasserstoffs, gelangt über den Niederschlag in das Grundwasser. Die Tritiumgehalte im Niederschlag, die im wesentlichen auf Kernwaffentests beruhen, sind in Mitteleuropa von etwa 5.000 T.U. (T.U. = Tritium Units) seit 1963 auf heute rund 15 T.U. abgesunken. Mit Tritium können mittlere Verweilzeiten im Grundwasser abgeschätzt werden. Die Vorfluter Rhein und Neckar sind zumindest zeitweise deutlich durch Tritium, das von den Atomkraftwerken abgegeben wird, markiert.

Mit der Kohlenstoff-14-Methode (^{14}C), durch die der relative Anteil des schweren, radioaktiven Kohlenstoff-14-Atoms im Vergleich zum Kohlenstoff-12-Atom gemessen und mit heutigen Gehalten verglichen wird, werden Verweilzeiten zwischen etwa ca. 1.000 und 25.000 Jahren ermittelt. Die Gehalte an Kohlenstoff-14 werden in % modern angegeben, aus denen Modellalter interpretiert werden können.

Im OGWL wurden in 71 Proben Tritiumgehalte bis 145 T.U. nachgewiesen, nur in 3 Messstellen war kein Tritium enthalten. Da gleichzeitig ^{14}C -Konzentrationen zwischen 3,2 und über 100 % modern gefunden wurden (46 Proben), die einem medianen Grundwassermodellalter von 2.200 Jahren entsprechen, kann bereits im OGWL bereichsweise eine Mischung von jungem (<50 Jahre) und älterem Grundwasser angenommen werden, so dass sich im Mischwasser ein ^{14}C -Konzentration von ca. 85 % modern einstellt.

Im MGWL und UGWL wurde Tritium in 24 Messstellen nachgewiesen; die dazugehörigen ^{14}C -Konzentrationen dieser Mischwässer liegt dabei immer über 40 % modern (d.h. unter 7.100 Jahren). Bei der überwiegenden Anzahl der Tritium-Nachweise in den tieferen Leitern müssen defekte Messstellen, vor allem defekte Ringraumabdichtungen, angenommen werden.

In den tieferen Leitern erreichen die Mediane der ^{14}C -Konzentrationen 61 % modern (Modellalter 4000 Jahre) im MGWL bzw. 25 % modern (Modellalter 11.200 Jahre) im UGWL. In Karte 13d sind die Modellalter eingetragen. Zu beachten ist, dass die dargestellten Brunnen und Messstellen in unterschiedlichen Tiefen verfiltert sind.

Großräumig zeigt die Verteilung aller bisher gemessenen ^{14}C -Konzentrationen im MGWL (Probenahmen zwischen 1982 und 1995, Anlage 13d) die Neubildungsgebiete in den Grabenrandbereichen mit vergleichsweise jungen Wässern und die Aufstiegsgebiete im zentralen Grabenbereich mit sehr alten Wässern. Im Norden und Südosten macht sich zudem die fehlende Ausbildung des OZH durch geringere Grundwasseralter bemerkbar. Die besonders alten Grundwässer westlich von Ludwigshafen werden auf den Zufluss einer sehr alten Grundwasserkomponente aus der Zwischenscholle zurückgeführt.

Prinzipiell werden die Verhältnisse, wie sie in der Hydrogeologischen Kartierung, Stufe II, 1987 beschrieben wurden, bestätigt.

5.5 Zeitliche hydrochemische Entwicklungen

Zeitliche hydrochemische Veränderungen manifestieren sich in langfristigen Trends (Jahre oder Jahrzehnte), mittelfristigen Zyklen (Jahresschwankungen) und kurzfristigen Variationen. Mögliche Ursachen sind z.B. Veränderungen der Beschaffenheit der Niederschläge oder der infiltrierenden oberirdischen Gewässer, der Eintragssituation oder der hydrologischen bzw. hydraulischen Verhältnisse.

Der Vergleich der hydrochemischen Verteilungskarten in den verschiedenen HGK's ist für die Beurteilung der Langzeitentwicklung wenig geeignet, da die für die Regionalisierung verwendeten Daten nicht an einheitlichen Messnetzen und für vergleichbare Grundwassersituationen gewonnen wurden. Für die Darstellung wurden außerdem unterschiedliche Klasseneinteilungen gewählt. Deshalb wird die zeitliche Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit anhand von Ganglinien ausgewählter Messstellen exemplarisch dargestellt. Es ist zu beachten, dass sich die Abbildungen 5.6 bis 5.13 sowohl hinsichtlich der Zeit- und Konzentrationsmaßstäbe als auch der Achsenzuordnung der Parameter unterscheiden.

5.5.1 Oberes Grundwasser

Je nach Einzugsgebiet, Eintragssituation und hydraulischen Randbedingungen ergeben sich für das obere Grundwasser verschiedene Gangliniencharakteristiken, die lokal ganz unterschiedliche Entwicklungen erkennen lassen.

Die Messstelle 544258 Heppenheim liegt in einem Einzugsgebiet mit überwiegend sandig ausgebildeter Überdeckung, in welchem eine schnelle Infiltration von Niederschlagswasser und damit auch eine schnelle Stoffverlagerung zu erwarten ist. Die Ganglinien (Abb. 5.6), über fünf Jahre in monatlichen Intervallen gemessen, lassen bei allen Inhaltstoffen mit Ausnahme des Kalium eine mehr oder weniger deutliche Periodizität mit Peaks in den Frühjahrsmonaten ohne große zeitliche Verzögerung zur Grundwasserneubildung erkennen.

Als Beispiel für große langfristige Variationen kann die Messstelle 1328 I Dannstadt dienen. Sie liegt in einem Gebiet mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung (Ackerbau, Weinbau) südöstlich von Dannstadt-Schauernheim. Im Einzugsgebiet kommen vorwiegend Hochflutlehme über Terrassensand vor. Die zugehörigen hydrochemischen Ganglinien (Abb. 5.7) zeigen langfristig steigende Trends, überlagert von einem ausgeprägten Maximum in den Jahren zwischen 1988 und 1994, das regional verbreitet nachweisbar ist. Dieser Verlauf ist besonders bei Calcium und Sulfat, außerdem bei Chlorid, Magnesium und untergeordnet Natrium erkennbar.

Nördlich von Frankenthal befindet sich die Messstelle 1335 Beindersheim (Abb. 5.8). Das Einzugsgebiet wird durch Terrassensande mit Hochwasserablagerungen charakterisiert. Der Flurabstand des Grundwassers beträgt mehr als 5 m. Neben eindeutigen landwirtschaftlichen Einflüssen zeigen sich auch Hinweise auf die Bebauung im Oberstrom. Ausgehend von ca. 20 mg/l (1980) sind die Nitratgehalte zwischenzeitlich auf maximal 200 mg/l angestiegen, wobei die größte Zunahme in den Jahren 1988/89 und 1992/93 erfolgte. Der steile Anstieg der Nitratkonzentrationen ist wahrscheinlich auf die Überschreitung der Speicher- bzw. Abbaufähigkeit der Grundwasserüberdeckung zurückzuführen, so dass Nitrat in das Grundwasser „durchgebrochen“ ist. Außerdem ist die mikrobielle Abbaukapazität im Grundwasser offenbar erschöpft, da seitdem auch die Hydrogenkarbonat-Gehalte tendenziell

zurückgehen. Alle übrigen Parameter sind auf vergleichsweise hohen Konzentrationsniveaus praktisch konstant geblieben bzw. zeigen nur geringe Veränderungen.

Abb. 5.6: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 544258 im OGWL bei Heppenheim für den Zeitraum 1989 bis 1995; monatliche Messungen**

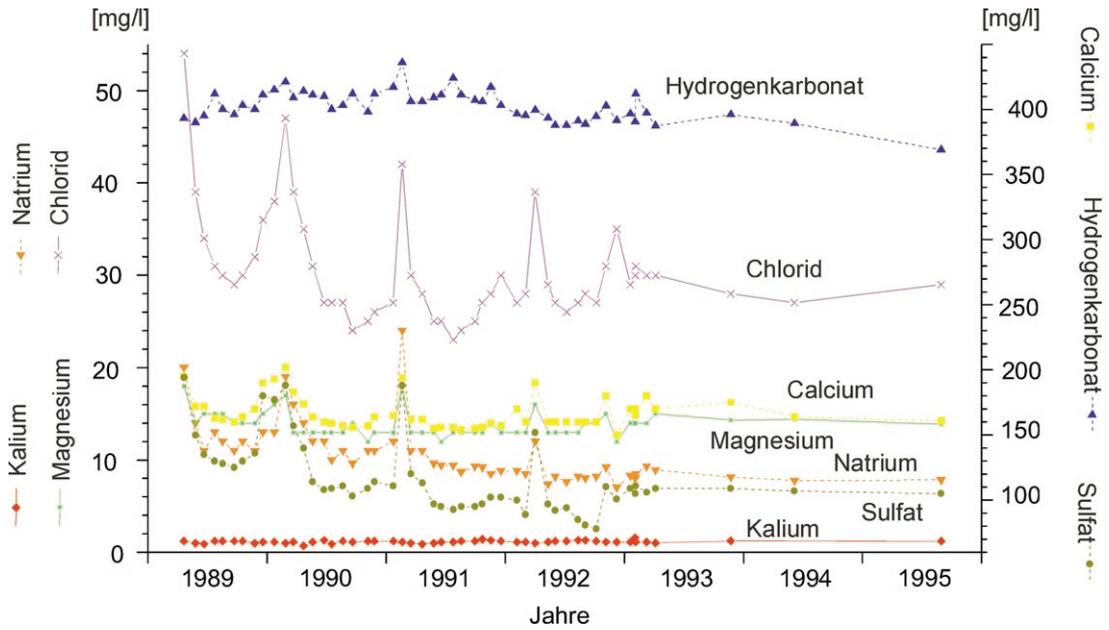
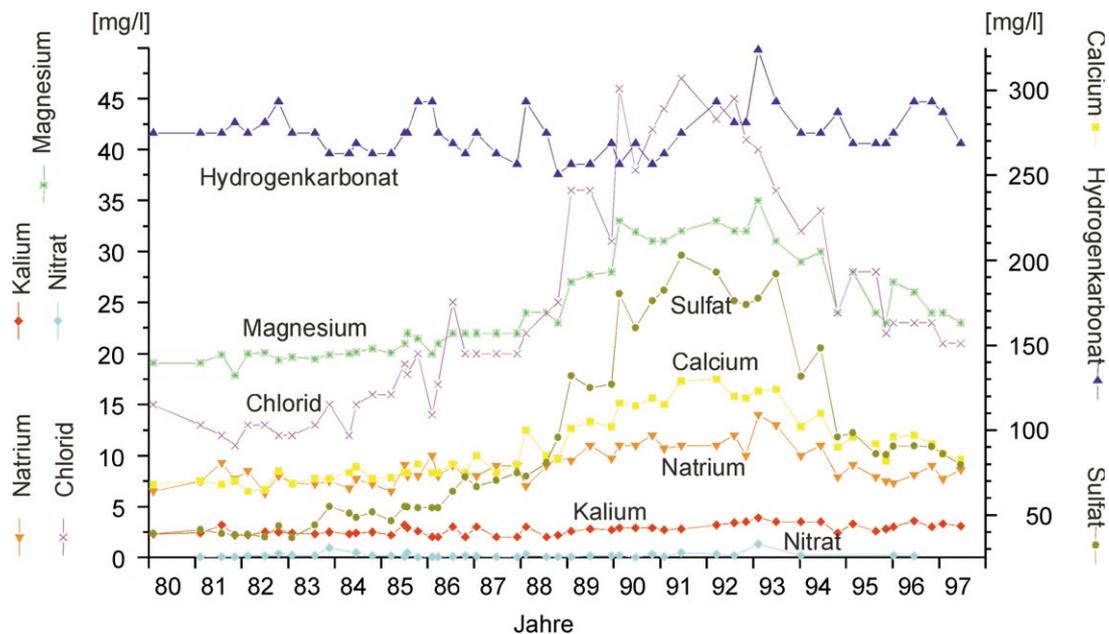


Abb. 5.7: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1328 I im OGWL südöstlich von Dannstadt-Schauernheim für den Zeitraum 1980 bis 1997; mehrjährige Messungen**



Der seit 1988/89 zurückgegangene Verbrauch stickstoffhaltiger Mineraldünger [15] ist allenfalls an der Stabilisierung der Nitratkonzentrationen seit 1993 auf hohem Niveau, nicht jedoch an einem Rückgang erkennbar. Die zukünftigen Untersuchungen müssen zeigen, ob sich die Verzögerung von 4 bis 5 Jahren zwischen verringertem Nitrat-Eintrag und der Wertekonstanz bestätigt.

Abb. 5.8: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1335 im OGWL nördlich von Frankenthal für den Zeitraum 1980 bis 1997; mehrjährige Messungen**

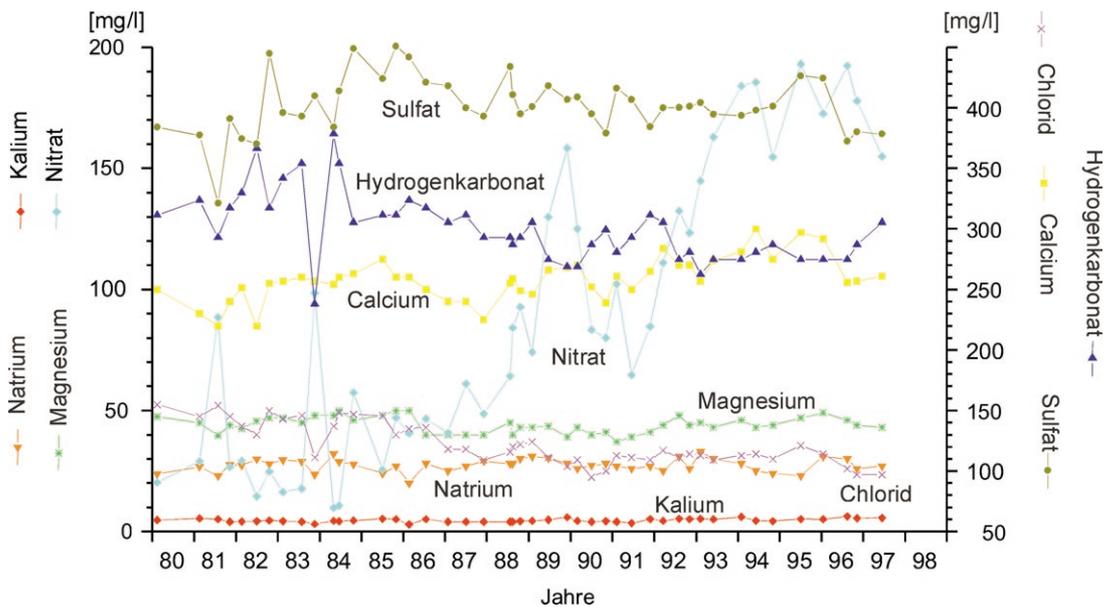
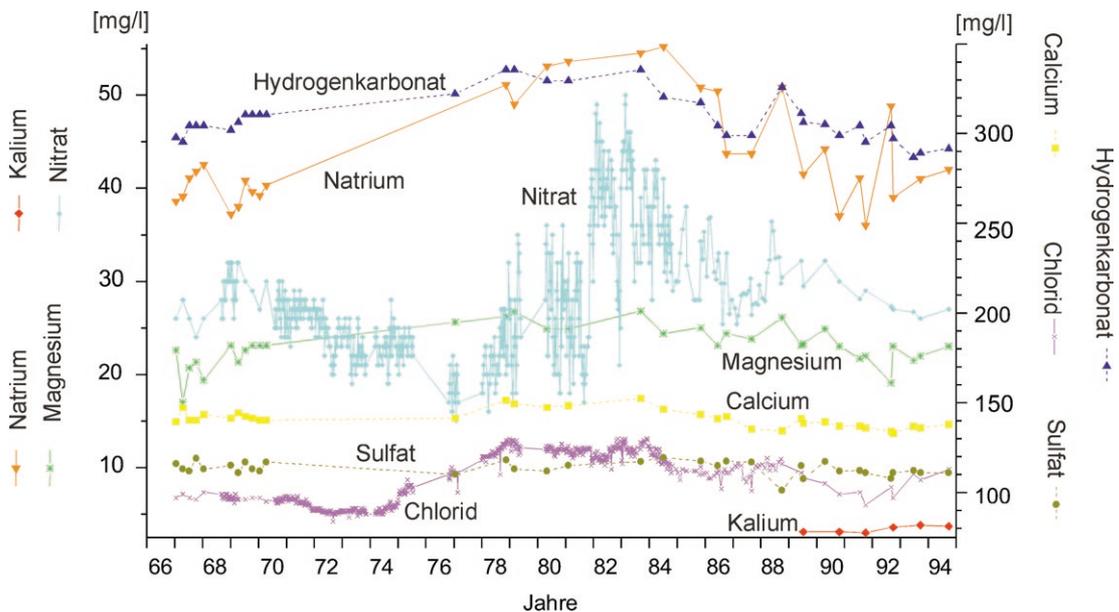


Abb. 5.9: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe des Brunnens 8 im OGWL der Wassergewinnungsanlage Rauschen westlich von Heidelberg für den Zeitraum 1966 bis 1994**



Für eine besonders lange Zeitspanne von 29 Jahre liegen die Zeitreihen des Brunnens 8 der Wassergewinnungsanlage Rauschen der Stadt Heidelberg vor (Abb. 5.9). Der Brunnen 8 liegt westlich von Heidelberg, im Einzugsgebiet stehen Hochflutlehme über Terrassenschotter an. Der Flurabstand beträgt rund 10 m. Über den Gesamtzeitraum sind langfristige Trends nicht eindeutig erkennbar. Allerdings sind in den Nassperioden der Jahre 1978 bis 1983 bei den meisten gemessenen Inhaltstoffen (Natrium, Chlorid, Nitrat, Calcium und Hydrogenkarbonat) Maximalkonzentrationen aufgetreten, deren Ursache eine erhöhte Grundwasserneubildung sein könnte. Die Konzentrationsschwankungen in den Zeitreihen können auch durch den Betrieb der Brunnenreihe hervorgerufen werden, da dieser zu variierenden Einzugsgebieten und damit zu unterschiedlichen Zusammensetzungen des gefördertten Grundwassers führen kann.

5.5.2 Mittleres Grundwasser

Zur Veranschaulichung der hydrochemischen Entwicklung des Grundwassers im Mittleren Grundwasserleiter (MGWL) sind die Ganglinien für drei Messstellen dargestellt. Die Messstelle 544220 Lorsch (Abb. 5.10) und der Brunnen M2 (Abb. 5.11) der Wassergewinnungsanlage Schwetzingen Hardt zeigen übereinstimmend weitgehend gleichbleibende Konzentrationen ohne Trends und größere mittelfristige Schwankungen, wie sie aufgrund des langsamen Grundwasserumsatzes im MGWL zu erwarten sind. Lediglich bei den Sulfatkonzentrationen gibt es mehrere kurzfristige Peaks. Insgesamt sind die Variationen und auch die absoluten Gehalte der Inhaltstoffe im Brunnen M2 größer als in der Messstelle 544220, vermutlich hervorgerufen durch dessen Betrieb innerhalb einer Brunnenreihe.

Eine massive Beeinflussung des Grundwassers im MGWL durch Einträge aus dem OGWL spiegeln die Ganglinien der dritten Messstelle wider (Abb. 5.12). Die Messstelle, Brunnen T1 des Wasserwerks Käfertal der Stadt Mannheim, liegt unterstromig des hydraulischen Fensters im OZH nordöstlich von Mannheim. Der Zustrom von Grundwasser aus dem OGWL ist deutlich zu erkennen. Die Entwicklung setzt etwa 1975 ein und hält bis zum Ende des dokumentierten Zeitraums (Ende 1998) an. Besonders markant ist der Anstieg bei Calcium und Sulfat, aber auch Chlorid und untergeordnet Natrium und Magnesium steigen allmählich an.

5.5.3 Unteres Grundwasser

In den Grundwassermessstellen im Unteren Grundwasserleiter (UGWL) sind bisher keine langfristigen Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit zu erkennen (Abb. 5.13). Die Konzentrationen und die Variationen sind vergleichsweise gering. In allen ausgewerteten Grundwassermessstellen können deutliche konstante Gehalte an Natriumhydrogenkarbonat berechnet werden, die auf den fortgeschrittenen Kationenaustausch hinweisen.

Abb. 5.10: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 544220 im MGWL bei Lorsch für den Zeitraum 1985 bis 1995; monatliche Messungen im Zeitraum März 1989 bis April 1991**

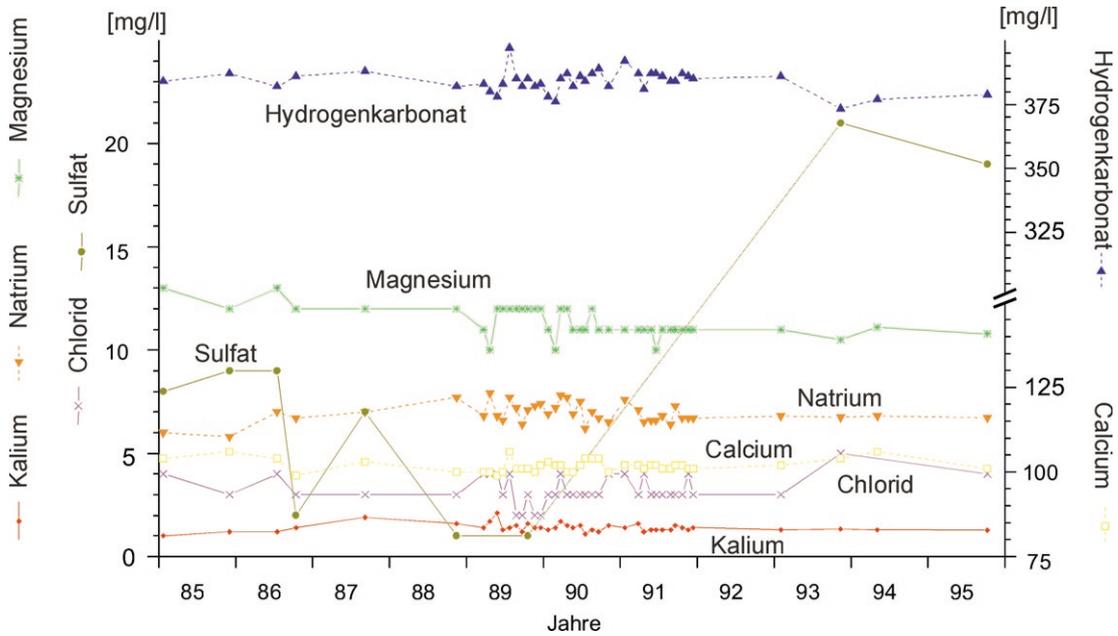


Abb. 5.11: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe im Wasserwerksbrunnen M2 der Wassergewinnungsanlage Schwetzinger Hardt im MGWL bei Schwetzingen für den Zeitraum 1972 bis 1994**

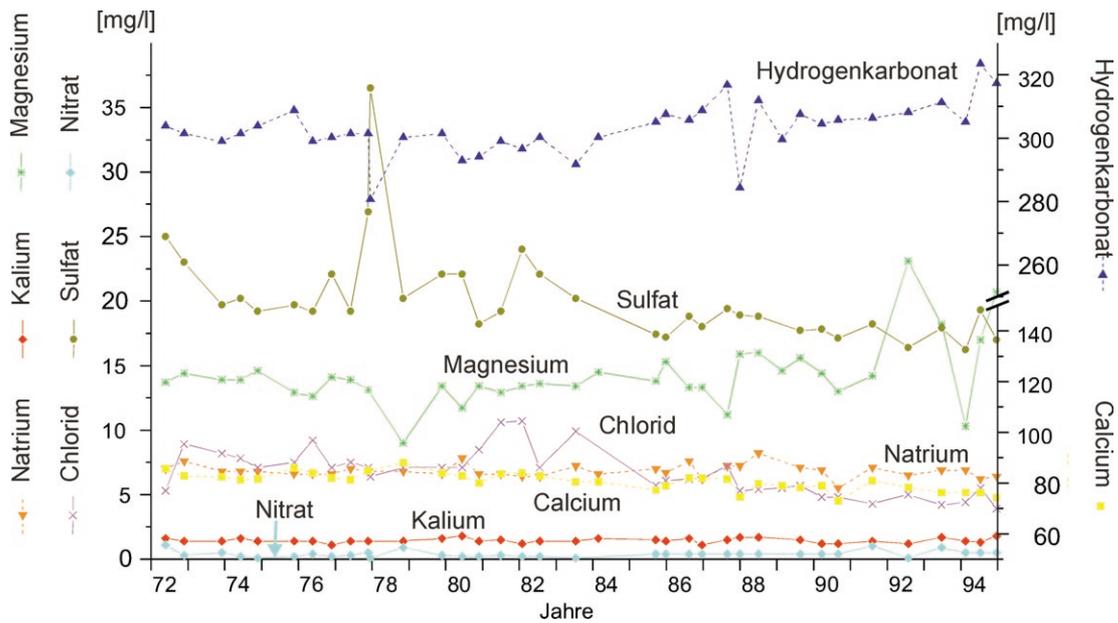


Abb. 5.12: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe im Brunnen T1 des Wasserwerks Käfertal im MGWL beim für den Zeitraum 1968 bis 1998**

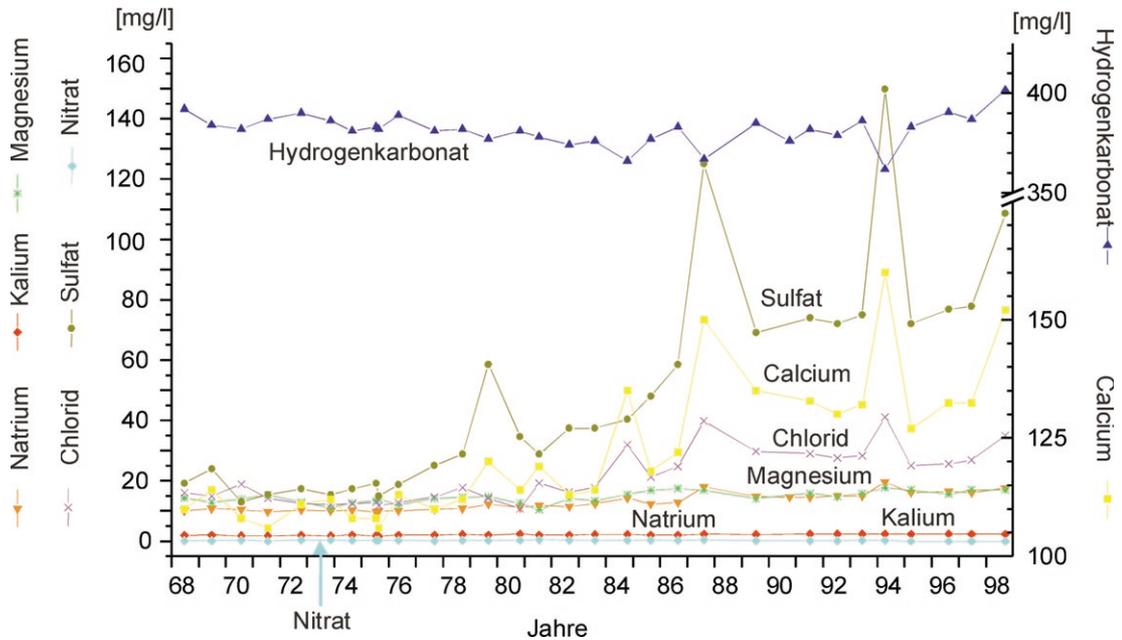
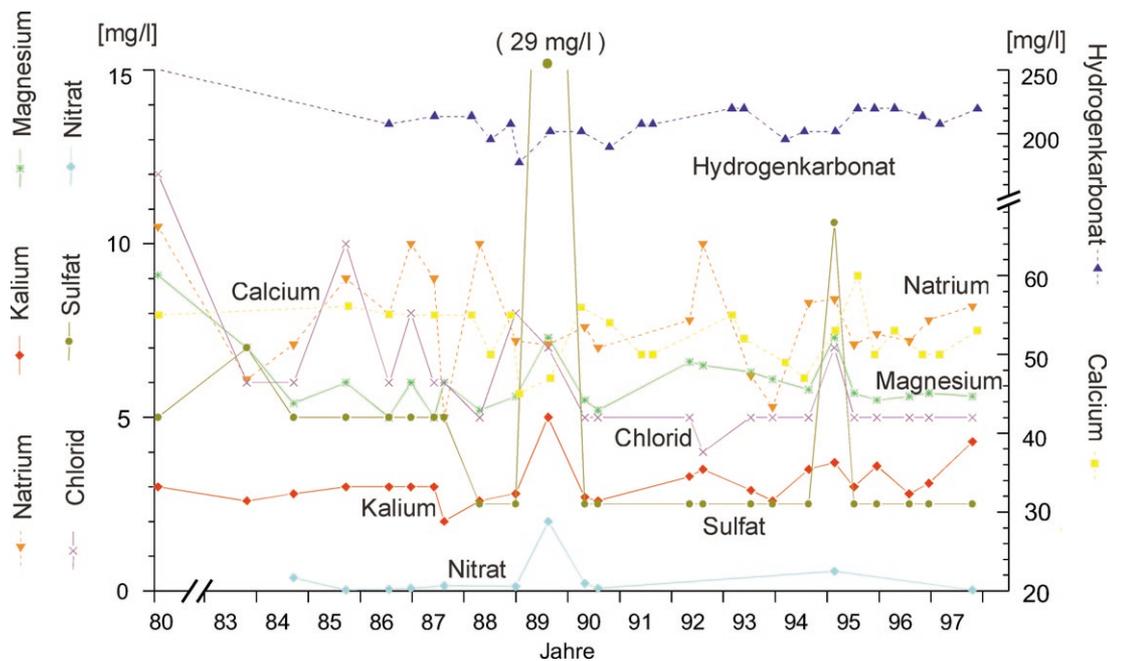


Abb. 5.13: **Zeitreihen ausgewählter Grundwasserinhaltsstoffe in der Messstelle 1328 II Dannstadt im UGW südwestlich Ludwigshafen für den Zeitraum 1980 bis 1997; das Modellalter des Grundwassers beträgt über 12.600 Jahre.**



5.6 Bewertung der hydrochemischen Untersuchungen

5.6.1 Situation im Oberen Grundwasserleiter

Die vorliegenden Befunde machen deutlich, dass es eine einheitliche Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im OGWL nicht gibt. Nach wie vor günstig sind die Verhältnisse in den überwiegend bewaldeten Gebieten im Bereich der Wasserwerke Schwetzingen Hardt, Käfertaler Wald und Bürstädter Wald. Die Gesamtkonzentrationen an anthropogen eingetragenen Substanzen sind – von lokalen Schadensfällen abgesehen – in diesen Waldgebieten sehr gering. Ein ansteigender Trend, der hier auf einen zunehmenden Schadstoffeintrag aus der Luft hinweisen würde, ist bisher nicht erkennbar. Demgegenüber stehen landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete, z.B. Neckarschwemmfächer, Frankenthaler Terrasse und Weinbaugebiete (am Gebirgsrand), die in der Vergangenheit und bereichsweise auch bis heute anhaltend einen gebietsweise großen Konzentrationsanstieg bei den typischen Agrarchemikalien (u.a. Nitrat, PSM und Chlorid) aufweisen. Beim Intensivanbau können die Konzentrationen dieser Substanzen im Grundwasser die Grenzwerte der TrinkwV weit übersteigen. Besonders auffällig ist, dass Atrazin und dessen Abbauprodukt Desethylatrazin nach wie vor in hohen Konzentrationen nachweisbar sind, obwohl die Anwendung von Atrazin wegen des häufigen Auftretens in Roh- und Trinkwässern bereits 1990 verboten wurde. In urbanen, wasserwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten sind immer noch deutliche anthropogene Grundwasserbelastungen vorhanden, eine Verbesserung der Grundwasserqualität ist nicht erkennbar. Eine größere Anzahl von Grundwasserschadensfällen – zumeist mit organischen Schadstoffen – befindet sich derzeit in Bearbeitung. Vereinzelt treten als neue Substanzen Pharmaka und hormonelle Störstoffe in den Blickpunkt des Interesses [15].

Eine langfristig positive Entwicklung weist die Beschaffenheit der Vorfluter auf, die in den Infiltrationswasser beeinflussten Bereichen auch zu einer Verbesserung der Grundwasserqualität beiträgt. Eine geogen bedingte Verschlechterung der Grundwasserqualität durch aufsteigende höherkonzentrierte Tiefengrundwässer als Folge der bereichsweise intensiven Nutzung ist im OGWL bisher nicht nachweisbar.

5.6.2 Situation im Mittleren Grundwasserleiter

Im MGWL ist die Grundwasserqualität, abgesehen von lokal auftretenden, geogen bedingten Einschränkungen (z.B. erhöhte Arsen-Konzentrationen), nach wie vor gut. Die hohen Modellalter von einigen 1000 Jahren (medianes Modellalter 4000 Jahre im MGWL) zeigen, dass das Grundwasser über große Bereiche noch anthropogen unbeeinflusst ist. Jedoch ist lokal eine Tendenz zur Zunahme der Gesamtmineralisation erkennbar, ein Hinweis auf eine Zunahme anthropogener Einflüsse im MGWL. Durch teufenbezogene Untersuchungen davon zu unterscheiden sind Veränderungen der Grundwasserqualität infolge aufsteigender höherkonzentrierter natrium- und chloridreicher Tiefengrundwässer als Konsequenz der bereichsweise intensiven Nutzung im MGWL. Bei der Interpretation von Analyseergebnissen aus dem MGWL ist immer die Möglichkeit einer Undichtigkeit der Messstelle (Ringraum, Rohrverbindungen) bzw. einer Veränderung der Probe bei der Probenahme (Zutritt von Luft-sauerstoff, Druckentlastung, Temperaturveränderung) zu beachten.

5.6.3 Situation im Unteren Grundwasserleiter

Im UGWL sind, wie auch die Isotopenmessungen erwarten lassen, bisher keine gravierenden anthropogenen Einflüsse nachweisbar. Die Grundwasserbeschaffenheit ist daher nach wie vor gut. Aufgrund der Potenzialdifferenzen zwischen dem oberflächennahen und dem tieferen Grundwasser kann jedoch bereichsweise oberflächennahes, verunreinigtes Grundwasser, vorallem im Stadtgebiet Ludwigshafen/Mannheim, in die mittleren und tieferen Stockwerke zusickern und langfristig zu negativen Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit in den tieferen Grundwasserleitern führen. Bereichsweise müssen schon heute „Reparaturmaßnahmen“ durch die Einrichtung von Abwehrbrunnen und den Einsatz von Aufbereitungstechnologien (z.B. im Wasserwerk Parkinsel) durchgeführt werden.

5.6.4 Kenntnislücken

Um mögliche Veränderungen der Grundwasserqualität frühzeitig erkennen und deren Ursachen identifizieren zu können, ist ein Überwachungsprogramm erforderlich, das eine Reihe von Anforderungen erfüllt:

- Im Rhein-Neckar-Raum konnten durch die aktuelle hydrogeologische Bearbeitung neue, bereichsweise durchgehend verbreitete Trennhorizonte (ZH1, ZH2, ZH3) kartiert werden. Sie untergliedern in ihrem Verbreitungsgebiet den OGWL und MGWL in weitere Teilstockwerke. Messstellen, die nur in diesen Teilstockwerken verfiltert sind, gibt es nur vereinzelt im Bereich von Grundwasser-Schadensfällen. Um die Auswirkungen der Zwischenhorizonte auf die Tiefenverlagerung von Schadstoffen und damit die Geschütztheit der tieferen Stockwerke besser beurteilen zu können, ist mittelfristig die Erweiterung des Messnetzes in den Teilstockwerken bzw. auch in den Niveaus der Trennhorizonte erforderlich.
- Wichtige Eingangsgrößen für die Beurteilung der Grundwasserqualität sind die Beschaffenheitsdaten der oberirdischen Gewässer und der Niederschläge, die zur Grundwasserneubildung beitragen. Für wasserwirtschaftliche Fragen sind auch häufig die aus Uferfiltrat bzw. aus dem Niederschlag gebildeten Grundwasserkomponenten zu trennen. Die dafür erforderlichen Informationen liefern Gütemessstellen an den oberirdischen Gewässern und Niederschlagsgütemessstellen, die in kurzen Intervallen untersucht werden. Neben den Hauptinhaltsstoffen eignen sich als chemische Tracer häufig Spurenstoffe wie Bor oder die Isotope des Wassers Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium. Soweit noch nicht vorhanden, sollten solche Messstellen eingerichtet und der Parameterumfang auf die jeweiligen Verhältnisse abgestimmt werden.
- Zur Beurteilung vertikaler stockwerksübergreifender Austauschvorgänge sollten gezielt ausgesuchte Messstellen in regelmäßigen Abständen mittels Bohrlochgeophysik auf die Verteilung von Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (Salinität) untersucht werden.

6 GRUNDWASSERÜBERDECKUNG

Der Anteil der Gesteinsschichten oberhalb der Grundwasseroberfläche – die sog. „Grundwasserüberdeckung“ wurde hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Bodenwasserhaushalt, die Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Kap. 4.3.2) und der Schutzfunktion gegenüber vertikalen Schadstoffverlagerungen näher untersucht.

6.1 Bodenkarte (Karte 14)

Die Bodenkarte 1:50.000 (Karte 14) bildet mit ihren Angaben über Bodenart, Bodenartenschichtung und Schichtmächtigkeiten die Datenbasis für die flächenbezogene Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (Kap. 4.3.2.6). Sie liefert außerdem Hinweise zu Grundwasserständen. Die Verbreitung von Grundwasserböden (Gleye, Auenböden) ist auf Gebiete mit geringen Flurabständen beschränkt und erlaubt Aussagen über das Ausmaß des kapillaren Aufstiegs in den Wurzelraum. Diese Daten werden u.a. benötigt für die

- Berechnung der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag und die
- Beurteilung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (Teilaspekt Boden).

Die Bodenkarte des Untersuchungsgebietes basiert auf Bodenkartierungen, die in jüngerer Zeit vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, vom Hessischen Landesamt für Bodenforschung und vom Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme in den jeweiligen Landesteilen durchgeführt wurden. Die veröffentlichten oder in Manuskriptform im Maßstab 1:25.000 vorliegenden Ergebnisse wurden nach einem abgestimmten Konzept generalisiert und für die hydrogeologischen Fragestellungen des Projektes ausgewertet.

6.2 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (Karte 15)

Die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung beschreibt in vereinfachter und integrierter Form die Gefährdung des Grundwassers durch Schadstoffverlagerungen von der Erdoberfläche durch den Boden und den tieferen Bereich der Grundwasserüberdeckung bis ins Grundwasser. Die Schutzfunktion ermöglicht daher sowohl Aussagen über das Gefährdungspotenzial hinsichtlich der Einträge aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung (z.B. Düngung, Pflanzenschutz) als auch für die Beurteilung von Deponiealtstandorten, Altlasten u.a.m. auf das Grundwasser. Für die Bewertung von punktuellen, massiven Schadstoffeinträgen sind aber immer schadstoff- und mengenspezifische Betrachtungen erforderlich.

Das hier angewendete Verfahren zur Bestimmung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung [16] basiert auf der Überlegung, dass die Sickerwasser-Verweilzeit maßgebend für die gesteinspezifischen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ist.

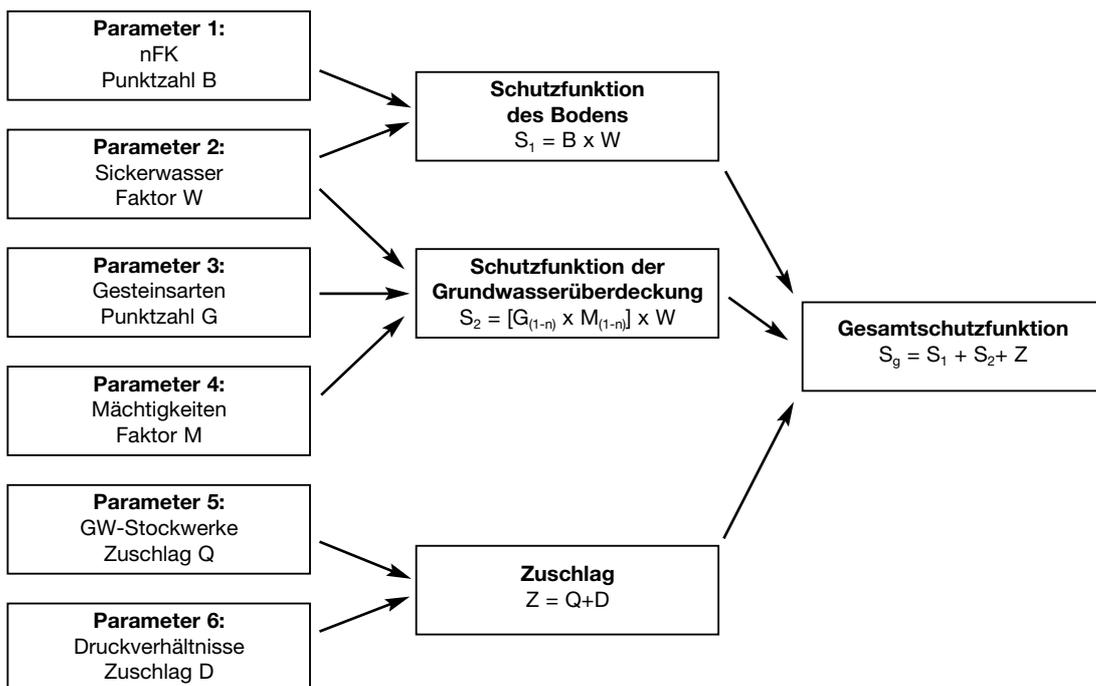
Die Sickerwasser-Verweilzeit hängt im Wesentlichen von den Faktoren

- gesteinspezifische Durchlässigkeit der einzelnen Einheiten der ungesättigten Zone,
- Sickerstrecke, d.h. Summe der Mächtigkeiten der „Deckschichten“- Einheiten, sowie
- anfallende Sickerwassermenge

ab.

Mit diesen aus den bodenkundlichen und geologischen Untergrundinformationen ableitbaren Daten lässt sich das angewandte punktebezogene Bewertungsverfahren durchführen. Dabei werden die Böden und die tiefere Überdeckung unterhalb des Bodens getrennt bewertet. Beide Bereiche sind durch die Sickerwassermenge, die die Untergrenze des durchwurzelbaren Bodenraumes verlässt, miteinander verknüpft.

Die Bewertung der Schutzfunktion des Bodens erfolgt durch die Bestimmung des Wasserspeichervermögens, d.h. durch Ermittlung der nFK [mm] über die gesamte Bodenmächtigkeit – vereinfacht bis 1 m Tiefe – anhand der aufsummierten einzelnen Bodenhorizonte. Die Bewertung der Verweilzeit des Sickerwassers in der tieferen ungesättigten Zone, d.h. im Tiefenbereich von 1 m bis zur Grundwasser-Oberfläche, erfolgt über die Hilfsgröße Kationenaustauschkapazität (KAK). Sie dient als Maß für die von der Durchlässigkeit der Lockergesteine abhängigen Sickerwasserzeiten und wird der petrographischen Ausbildung der Gesteinseinheiten zugeordnet (höhere KAK mit zunehmendem Feinkornanteil der Sedimente). Die Punktbewertung der Gesteinsart der tieferen ungesättigten Zone wurde anhand der tabellarischen Verknüpfung zwischen KAK-Literaturangaben – geologischer Gesteinsbeschreibung und Punktzahl durchgeführt (s.Tab. 4 in [16]). Die flächenhafte Ermittlung der Schutzfunktion erfolgte über regionalisierte punktuelle Bewertungen an Aufschlüssen wie z.B. Bohrungen oder definierten Homogenitätsbereichen. Folgende Faktoren fließen in die Bewertung ein:



Parameter 1: Nutzbare Feldkapazität (nFK) (Punktzahl B)

Die nutzbare Feldkapazität wurde aus der digitalen Bodenkarte 1 : 50.000 abgeleitet.

Parameter 2: Sickerwassermenge (Faktor W)

Jährliche mittlere Grundwasserneubildungsrate; hier wurden die Daten des Grundwassermodells verwendet.

Parameter 3: Gesteinsart (Punktzahl G)

Es wurden auf der Grundlage der bodenkundlichen Großeinheiten „homogene Teilbereiche“ abgegrenzt. Für diese zum Teil noch horizontal untergliederten Teilbereiche wurden anhand der verfügbaren Bohrungen mittlere „Gesteinsarten“ und für diese eine spezifische Punktzahl pro Meter festgelegt.

Im linksrheinischen Teilgebiet wurde die Punktzahl für die Gesteinsart an Bohraufschlüssen anhand der petrographischen Ausbildung rechnergestützt ermittelt und anschließend regionalisiert.

Parameter 4: Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung (Faktor M)

Zur Bestimmung der Gesamtmächtigkeit der Grundwasserüberdeckung wurde der Grundwassergleichenplan des oberen Grundwassers sowie ein digitales Höhenmodell verwendet.

Parameter 5: Schwebende Grundwasserstockwerke (Zuschlag Q)

Wurden im Arbeitsgebiet nicht berücksichtigt.

Parameter 6: Druckverhältnisse (Zuschlag D)

Wurden im Arbeitsgebiet nicht berücksichtigt.

Gesamtschutzfunktion:

Die Verknüpfung der Parameter 1-6 ergibt die Gesamtschutzfunktion als Punktwert. Für die flächenhafte Darstellung wurde eine Einteilung in 5 Klassen mit den zugehörigen Schutzfunktionsattributen sehr hoch bis sehr gering vorgenommen. Die mit Farben dargestellten Punktwertklassen geben die Gebiete wieder, in denen größenordnungsmäßig gleiche Sickerwasserverweilzeiten zu erwarten sind. Die Bandbreite der Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung reicht dabei von wenigen Tagen bis zu mehreren Jahrzehnten. Obwohl eine Korrelation zwischen den ermittelten Schutzfunktionspunktwerten und der Sickerwasserverweilzeit nicht direkt abgeleitet werden kann, lassen die Schutzfunktionsklassen nicht nur eine relative Bewertung der Gebietsflächen untereinander hinsichtlich des Gefährdungspotenzials zu, sondern gestatten auch eine Abschätzung der zeitlichen Dauer potentieller Schadstoffverfrachtungen. Die nachfolgende tabellarische Auflistung (in Anlehnung an die Tabelle 7 aus [16]) gibt einen Orientierungsrahmen für die Verknüpfung von Schutzfunktionspunktwerten und der Sickerwasserverweilzeit in der Grundwasserüberdeckung.

Gesamtschutzfunktion	Gesamtpunktzahl (S)	Potenzielle Sickerwasserverweilzeit
sehr hoch	> 4000	> 25 Jahre
hoch	> 2000 – 4000	ca. 10 – 25 Jahre
mittel	> 1000 – 2000	ca. 3 – 10 Jahre
gering	> 500 – 1000	mehrere Monate bis ca. 3 Jahre
sehr gering	> 500	wenige Tage bis mehrere Monate

Ergebnis (Karte 15)

Generell wurde für Gebiete, für die ein oder mehrere Parameter nicht erhoben werden konnten, wie z.B. im Bereich von Siedlungsflächen, keine Schutzfunktion ermittelt.

Für das Gebiet im Nordwesten (Rheinland-Pfalz), wurde ebenfalls keine Auswertung vorgenommen. Hierbei handelt es sich um die Hochflächen der Randscholle vor der westlichen Grabenschulter, für die flächendeckende Daten über die Grundwasseroberfläche und den petrographischen Aufbau fehlen.

Die übrigen Ergebnisse zeigen, dass die Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten im Bereich des Rheintalgrabens gering bis sehr gering ist (z.T. deutlich unter 1000 Punkten). Dies ist ganz überwiegend in den gut bis sehr gut durchlässigen Sedimenten des Oberrheingrabens begründet. Höhere Werte der Schutzfunktion treten nur im Osten am Übergang zum Odenwald und linksrheinisch westlich der Frankenthaler Terrasse auf. Dort werden im Bereich der Lössriedelflächen, bedingt durch größere Flurabstände in Verbindung mit geringer durchlässigen Schichten der Grundwasser-Überdeckung Schutzfunktionswerte von deutlich über 2000 Punkten erreicht, was einer hohen bis sehr hohen Schutzfunktion entspricht.

7 MATHEMATISCHES GRUNDWASSERMODELL

7.1 Allgemeines

Der Einsatz numerischer Grundwassermodelle hat sich in den zurückliegenden rd. 20 Jahren nach und nach zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Erkundung und Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen sowie bei der Gefährdungsabschätzung entwickelt. Durch die zunehmende Vielfalt und Komplexität der wasserwirtschaftlichen Fragestellungen sowie durch die Weiterentwicklung von Modellsoftware und Computerhardware wird die Bedeutung des Modelleinsatzes zukünftig sicherlich weiter gesteigert.

Grundlage jeder Modelluntersuchung stellt die Erfassung und Schematisierung der regionalen und örtlichen Gegebenheiten (Untergrundaufbau, Hydrologie, Grundwassernutzung) dar. Die Schematisierung, d.h. das grundlegende Modellkonzept mit dem die Abbildung des Grundwasserleiters und insbesondere die darin ablaufenden Strömungs- und ggf. Transportprozesse erfolgen soll, erfolgt zu Beginn der grundwasserhydraulischen Modelluntersuchung. Nach der anschließenden Aufstellung des Modelldatensatzes ist die Eichung, d.h. die Anpassung dieses Modelldatensatzes ein wesentlicher Bestandteil derartiger Untersuchungen, um die speziellen Naturgegebenheiten bestmöglich zu reproduzieren.

7.2 Fortschreibung des großräumigen Grundwassermodells

7.2.1 Einführung

Ziel der Überarbeitung des 1985 erstellten Grundwassermodells war es, ein dem neuesten Stand der Erkenntnisse angepasstes und von den beteiligten Institutionen der betroffenen Bundesländer anerkanntes Instrument zu erhalten, das als Grundlage für die Beurteilung von Fragen zur künftigen Grundwasserbewirtschaftung im Untersuchungsraum dienen kann. Das Büro Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH, Koblenz, wurde von den beteiligten Ländern mit der Überarbeitung und Verfeinerung des bestehenden Grundwassermodells beauftragt. Im Vergleich zum bisherigen Rhein-Neckar-Modell ergaben sich dabei folgende wesentliche Änderungen:

- Berücksichtigung neuer Erkenntnisse zur Geologie – statt bisher zwei (bereichsweise drei) werden jetzt fünf Grundwasserleiter unterschieden,
- Zur detaillierteren räumlichen Auflösung wurde das Modellraster von 1.000 m auf 500 m Knotenabstand verfeinert,
- Wesentliche Eingangsdaten (Entnahmen) und Randbedingungen (Gewässer, Grundwasserneubildung) wurden für den aktuellen Zeitraum recherchiert bzw. mit weiterentwickelten Verfahren berechnet.

Das stationäre Grundwassermodell wurde an Hand folgender Vergleichszustände angepasst bzw. verifiziert:

- Oktober 1990 - mittlere Grundwasserverhältnisse (Stationäre Bezugsvariante **SBV 1990**)
- Oktober 1996 - aktuelle Nutzungssituation (Verifikation **VER 1996**)

Die instationäre Eichung umfasste den Zeitraum 1983-1993. Nach Abschluss der gesamten Modelleichung wurde mit dem stationären Modell die Auswirkung der prognostizierten Entnahmesituation für das Jahr 2010 betrachtet.

7.2.2 Modellaufbau

7.2.2.1 Geometrien und Systemparameter

Im Untersuchungsgebiet wurden seit Mitte der siebziger Jahre eine Vielzahl von klein- und großräumigen Untersuchungen zu grundwasserhydraulischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen durchgeführt. Die im Rahmen der aktuellen Untersuchung berücksichtigten wesentlichen Modelluntersuchungen sind im folgenden aufgelistet:

- Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum, Mathematisches Grundwassermodell, 1985
- Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Rheinhessen, Grundwassermodell Worms/Oppenheim, 1994
- Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried, Grundwassermodell, 1997

Das Modellgebiet umfasst den gesamten wasserwirtschaftlich bedeutsamen Rheintalgraben zwischen Worms, Speyer und Heidelberg (Karte 17a).

Die nördliche und östliche Modellgrenze entspricht der des länderübergreifenden Modells von 1985 und wird durch die Trennstromlinie durch das Wasserwerk Jägersburger Wald, Brunnengalerie Mitte und den Odenwaldrand beschrieben. Der südliche Modellrand folgt der Trennstromlinie außerhalb der Rheinniederung und stellt insofern eine geringfügige Anpassung der alten Modellgrenze dar. Die westliche Modellbegrenzung folgt dem östlichen Rand der „Zwischenscholle“. Im bisherigen Modell war die Zwischenscholle noch in das Modell einbezogen.

Das Grundwasserströmungsmodell wurde in diesen Grenzen als Nord-Süd orientiertes, regelmäßiges Quadratnetz mit Knotenabständen von 500 m aufgebaut und umfasst mit 5.220 Knoten in einer Ebene eine Fläche von rd. 1.300 km². Das bisherige Rhein-Neckar-Modell umfasste eine um etwa 200 km² größere Fläche im Westen und Südwesten („Zwischenscholle“); dieser Bereich ist vorwiegend durch die mit Lös bedeckten „Riedel“, mit Grundwasserflurabständen >10,0 m, kleiner Grundwasserneubildung und dementsprechend geringer wasserwirtschaftlicher Bedeutung, charakterisiert.

Das Modell ist dreidimensional aufgebaut und umfasst mit fünf Grundwasserleitern und vier Trennhorizonten insgesamt neun Schichten. Die vertikale Gliederung des großräumigen Grundwassermodells ist in einem West-Ost und einem Nord-Süd verlaufenden Schnitt in den Abbildungen 7.1 und 7.2 und die Schnittpuren hierzu in Abbildung 7.3 dargestellt.

Abb. 7.1: Vertikale Gliederung des Modells im West-Ost-Schnitt

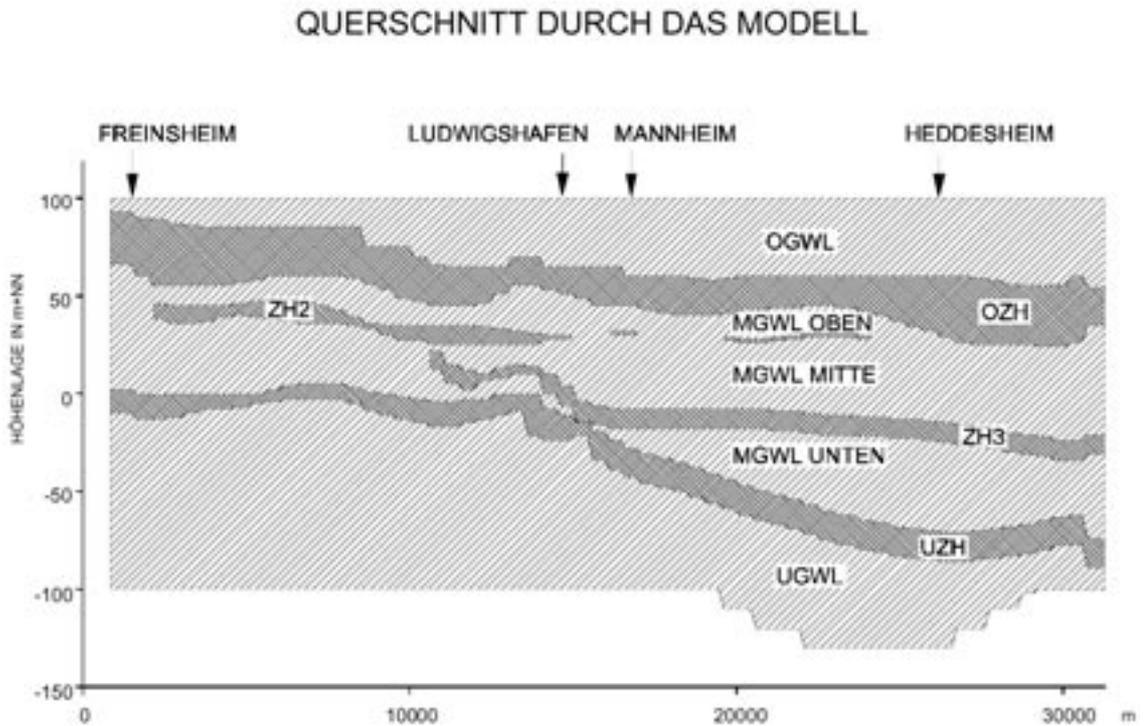


Abb. 7.2: Vertikale Gliederung des Modells im Nord-Süd-Schnitt

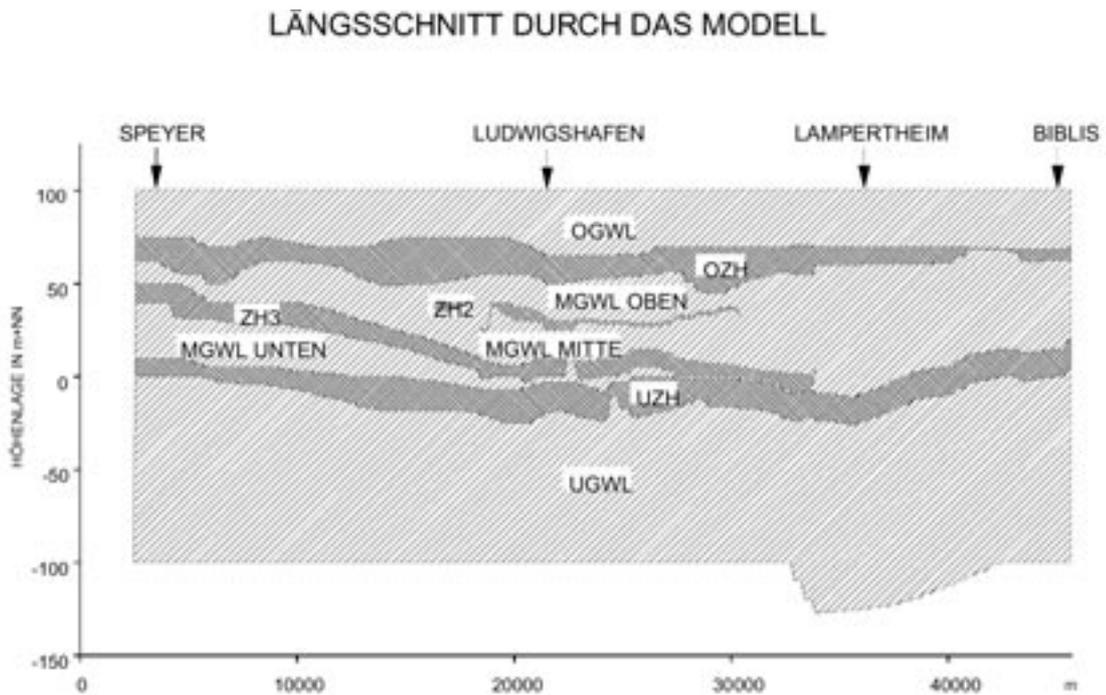
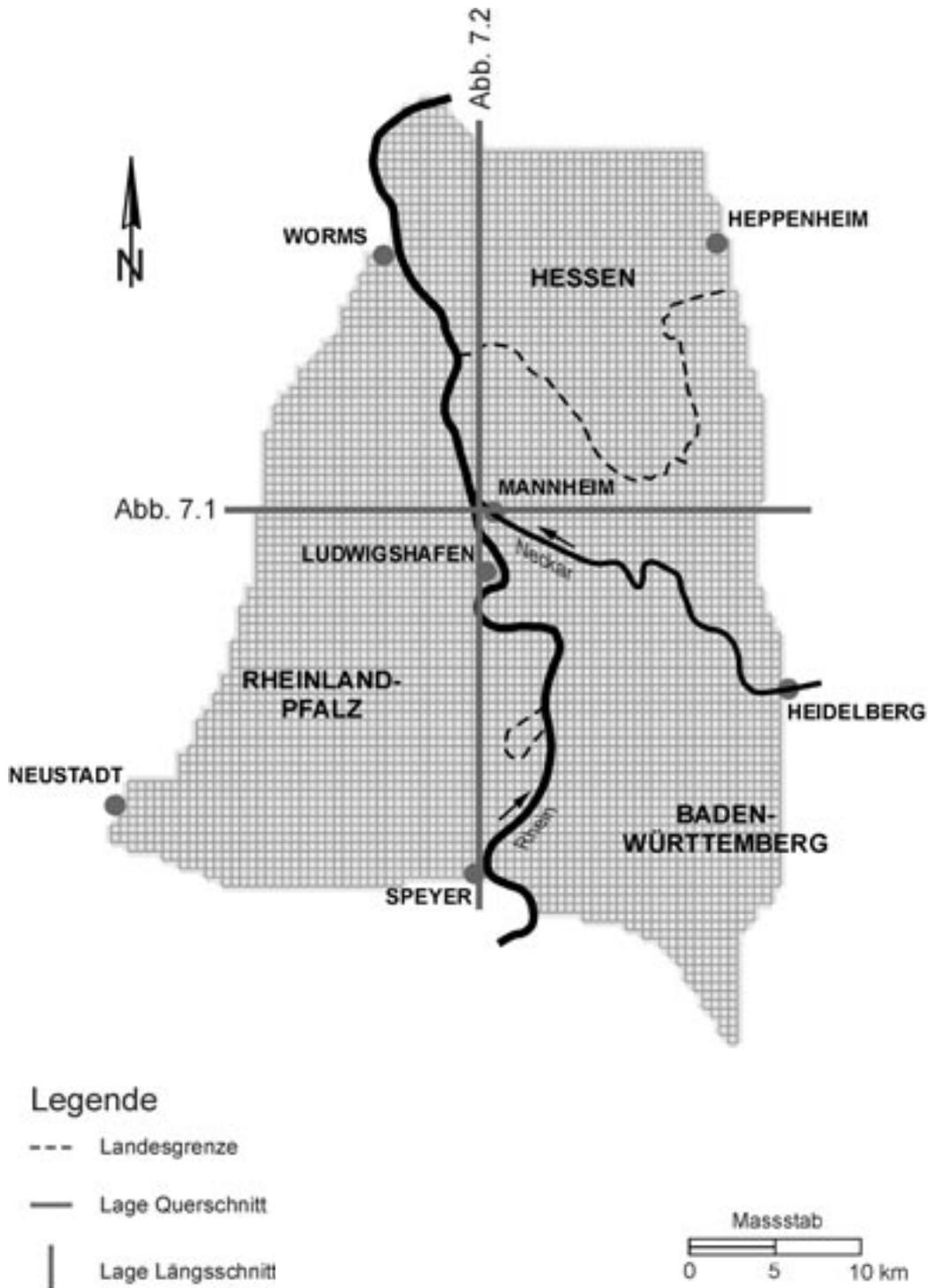


Abb. 7.3: Schnittpuren zu Abb. 7.1 und 7.2 durch das Modellgebiet



Oberer Grundwasserleiter (1. Modellstockwerk)

Der Obere Grundwasserleiter (OGWL) umfasst die Ablagerungen oberhalb des Oberen Zwischenhorizontes. Er wird im gesamten Modellgebiet integriert betrachtet. Der rechtsrheinisch im Oberen Kieslager örtlich kartierte Trennhorizont (ZH1) wurde nicht in das Modell einbezogen. Bei Detailuntersuchungen in diesem Gebiet sollte er jedoch ggf. berücksichtigt werden. Im hessischen Teil wurde die OGWL-Basis aus dem bestehenden Grundwassermodell „Hessisches Ried“ übertragen. Die wassererfüllte Mächtigkeit des OGWL ist in Karte 16, Bild 1 für den Anpassungszustand 1990 (hydrologisch mittlere Verhältnisse) dargestellt. Die Mächtigkeit des OGWL nimmt entsprechend dem Einfallen der Schichten von West nach Ost zu.

Oberer Zwischenhorizont

Der Obere Zwischenhorizont (OZH), der fast im gesamten Modellgebiet ausgebildet ist, bewirkt eine ausgeprägte Stockwerksgliederung und ist damit für den Zustrom zu/aus den tieferen Grundwasserleitern von maßgebender Bedeutung. Die Oberfläche des OZH entspricht der Basis des OGWL, die Unterfläche des OZH entspricht der Oberfläche des MGWL oben. Im hessischen Teil wurde die OZH-Unterfläche aus dem bestehenden Grundwassermodell „Hessisches Ried“ übertragen. Die Mächtigkeit und Verbreitung des OZH im Grundwassermodell ist in Karte 16, Bild 2 dargestellt. Geringmächtige Bereiche finden sich im Raum nordöstlich Worms, im Raum Neustadt, sowie im Hockenheimer Rheinbogen.

Mittlerer Grundwasserleiter (2., 3. und 4. Modellstockwerk)

Der Mittlere Grundwasserleiter (MGWL) wird durch die bereichsweise ausgebildeten Zwischenhorizonte 2 und 3 (ZH2 und ZH3) in die 3 Grundwasserleiter

- Mittlerer Grundwasserleiter oben (MGWL oben),
- Mittlerer Grundwasserleiter mitte (MGWL mitte) und
- Mittlerer Grundwasserleiter unten (MGWL unten)

untergliedert. Aufgrund des mehrschichtigen Modellansatzes wird die Unterteilung des MGWL auch in Bereichen ohne einen hydraulisch wirksamen Zwischenhorizont ZH2 und ZH3 fortgeführt. Die Zwischenhorizonte sind dort mit sehr geringen Mächtigkeiten abgebildet und erhielten Durchlässigkeiten die denjenigen des Grundwasserleiters entsprechen.

Die Verbreitungen und Mächtigkeiten der Trennhorizonte ZH2 und ZH3 sowie des MGWL oben, mitte und unten können aus der Karte 16, Bilder 3 bis 7 entnommen werden.

Unterer Zwischenhorizont

Der Untere Zwischenhorizont (UZH) trennt die Ablagerungen des Jungquartärs von denen des Altquartärs und Pliozäns. Die Oberfläche des UZH entspricht der Basis des MGWL unten. Auf linksrheinischer Seite konnte die Mächtigkeit und damit die Unterfläche des UZH vorgegeben werden. Rechtsrheinisch ergab sich die Unterfläche für den Modellaufbau aus einer konstant angesetzten Mächtigkeit von 20 m. Auch im hessischen Teil des Modellgebiets, in dem der UZH ursprünglich nicht berücksichtigt werden sollte, ergab sich aufgrund des gemessenen Druckunterschiedes (Tiefmessstelle Nordheim) zwischen MGWL

und UGWL die Notwendigkeit der Berücksichtigung des UZH. Dabei wurde im nordwestlichen Teil des Modellgebiets auf Informationen des Modells „Worms-Oppenheim“ [17] zurückgegriffen. Die modellseitig berücksichtigte Mächtigkeit und Verbreitung des UZH ist in Karte 16, Bild 8 dargestellt.

Unterer Grundwasserleiter

Der Untere Grundwasserleiter (UGWL) umfasst die Ablagerungen des „Altquartärs“ und „Pliozäns“. Die Oberfläche des UGWL entspricht der Unterfläche des UZH. Im Modell wurde die Basis des UGWL auf konstant -100 mNN gesetzt, wenn die Oberfläche höher als -80 mNN liegt. Liegt die Oberfläche des UGWL unterhalb von -80 mNN, so ergibt sich die Basis des UGWL durch Ansatz einer Mindestmächtigkeit von 20 m. Im nordwestlichen Modellteil wurde die Basis des Pliozäns aufgrund vorliegender Profile auf ± 0 mNN gesetzt. Hier steigt die Basis des UGWL Richtung Worms deutlich an. Die modellseitig berücksichtigte Mächtigkeitsverteilung ist in Karte 16, Bild 9 dargestellt.

Horizontale Durchlässigkeitsbeiwerte und Transmissivitäten der Grundwasserleiter

Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden im Rahmen der Auswertungen zum hydrogeologischen Aufbau des Grundwasserleitersystems in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg zusammengestellt, regionalisiert und auf das großräumige Grundwassermodell übertragen. Für den hessischen Teil des Modellgebiets wurden im OGWL und MGWL die Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwassermodells „Hessisches Ried“ verwendet, im UGWL wurde ein einheitlicher Wert von 5×10^{-5} m/s angesetzt.

Die aus den angesetzten Durchlässigkeitsbeiwerten resultierenden Transmissivitäten für die einzelnen Modellstockwerke sind in Karte 16, Bilder 10 bis 14 zusammengestellt.

Vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte und Leakagefaktoren der Zwischenschichten

Zur Vorgabe der vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerte der Zwischenschichten wurden Faziesverteilungen erstellt. Diese wurden im Modell in entsprechende Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Leakagefaktoren (Quotient aus Durchlässigkeitsbeiwert und Schichtdicke der Zwischenschicht) umgesetzt.

Die Verteilung der Leakagefaktoren der Zwischenschichten sind ebenfalls in der Karte 16, Bilder 15 bis 18 zusammengestellt.

Speicherkoeffizienten

Als Speicherkoeffizient wurden im gesamten Modellgebiet einheitliche Werte in Anlehnung an das bisherige großräumige Grundwassermodell für den Rhein-Neckar-Raum zugrunde gelegt, und zwar:

- für freie Verhältnisse 15 % (OGWL = 1. Modellstockwerk)
- für gespannte Verhältnisse 1 ‰ (MGWL und UGWL = Modellstockwerke 2 bis 5).

7.2.2.2 Randbedingungen

Entnahmen

Aus den zur Verfügung stehenden Entnahmedaten wurden diejenigen im Modell berücksichtigt, die eine Jahresentnahme von mehr als 25.000 m³ aufwiesen. Im Modell wurden die Entnahmen den einzelnen Knoten und Stockwerken anhand der Koordinaten und der Lage der Filterstrecken zugeordnet. Die Berücksichtigung der Beregnungsentnahmen erfolgte in Rheinland-Pfalz und Hessen flächenhaft anhand von Beregnungsflächen. In Hessen wurden zusätzlich die bekannten Beregnungsbrunnenentnahmen berücksichtigt. In Baden-Württemberg wurden keine flächenhaften Beregnungsentnahmen angesetzt (vgl. auch Kap. 4.3.6).

Zu- und Abflüsse über den Modellrand

Die unterirdischen Zu- und Abflüsse über die Modellränder wurden aus dem existierenden länderübergreifenden Grundwassermodell übernommen und wie folgt modifiziert:

- Entlang des westlichen Modellrandes wurden die Randzuflüsse erhöht, da die Zwischenscholle nicht mehr im Modell liegt. Die Erhöhung entspricht der mittleren Grundwasserneubildung von ca. 7 Mio. m³/a in der jetzt nicht mehr im Modell berücksichtigten Fläche (200 km²).
- Die Randzu- und abflüsse des bisher integriert betrachteten MGWL wurden zu gleichen Teilen auf den MGWL oben, mitte und unten (Modellstockwerke 2 bis 4) aufgeteilt.
- Im Raum Speyer wurde im MGWL ein verstärkter Abstrom in Richtung der Wassergewinnung „Speyer-Süd“ berücksichtigt, die nicht mehr im Modell liegt.
- Im UGWL wurde im nordwestlichen Modellgebiet ein Randabstrom von Hessen in der Größenordnung von ca. 1,5 Mio. m³/a (50 l/s) zu den linksrheinischen, tiefen Grundwasserentnahmen im Industriegebiet Worms-Nord berücksichtigt.

Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wurde für vieljährig mittlere Verhältnisse (1961-1993) sowie für die Einzeljahre des Zeitraums 1983 bis 1993 berechnet (Kap. 4.3.2). Auf die Berücksichtigung der jährlichen Neubildung im Zeitraum 1983 bis 1993 als Modellrandbedingung wird in Kapitel 7.2.4 eingegangen. Die der stationären Bezugsvariante (SBV 1990) zugrundeliegende Grundwasserneubildungsverteilung enthält die Karte 11.

Oberirdische Gewässer

Als Grundlage für den Modellaufbau wurde auf rheinland-pfälzischer und baden-württembergischer Seite eine digitale Bestandsaufnahme der oberirdischen Gewässer durchgeführt. Diese Daten (Wasserspiegel, Sohle, Fläche, Leakagefaktoren) wurden auf die Modellknoten umgesetzt. Im hessischen Teil wurden die Daten des Landesmodells übernommen. Der Wasserstand in den kleineren Fließgewässern resultiert aus der digitalen Bestandsaufnahme und spiegelt etwa durchschnittliche hydrologische Situationen wieder. Für die beiden Hauptgewässer Rhein und Neckar wurden die Wasserstände aus den vorliegenden Pegel-daten auf das Modell übertragen.

7.2.3 Stationäre Eichung

7.2.3.1 Vorgehensweise

Als Referenzsituation wurden die Grundwasserverhältnisse im Oktober 1990 zugrunde gelegt und die Anpassung der Modelldatensätze anhand der gemessenen Piezometerhöhen im Oktober 1993 und 1996 überprüft.

Im Oktober 1990 lagen in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes etwa vieljährige mittlere Grundwasserstände vor. Im stationären Modell wurden hierzu folgende Eingangsdaten verwendet:

- Jahressummen der Grundwasserentnahmen 1990
- vieljährige mittlere Grundwasserneubildung der Jahresreihe 1961-1993
- Wasserstand der oberirdischen Hauptgewässer Rhein und Neckar aus Pegeldaten (Mittel der Jahresreihe 1983-1993)

Eine systematische Anpassung der Untergrunddurchlässigkeiten der einzelnen Grundwasserleiter zur Optimierung der Anpassung der berechneten an die gemessenen Grundwasserstände wurde nur in den engen Grenzen der Eingangsdatensätze durchgeführt. Hier sollte im Rahmen der Fortschreibung des großräumigen Modells (Kap. 7.2.6) gestützt auf maßgebende lokale Untersuchungen eine systematische fortlaufende Anpassung erfolgen.

Im Rahmen der stationären Modellanpassung stellte sich die Durchlässigkeitsverteilung des OZH als ein wesentlicher Systemparameter heraus. Zudem wurde bei der Differenzierung des OZH in den einzelnen Ländern in der Vergangenheit unterschiedlich vorgegangen. Dies betrifft vor allem die Zuordnung zur „tonigen Fazies“, die bei unterschiedlichen Mächtigkeiten der Ton-/ Schlufflagen erfolgte. Die vorliegenden landesspezifischen Interpretationen wurden daher modellgebietsweit harmonisiert und auf das Grundwassermodell übertragen, womit eine deutlich bessere Reproduktion der Druckdifferenzen möglich war.

Bei den Gewässerrandbedingungen wurden folgende Änderungen/Ergänzungen an den Eingangsdaten durchgeführt:

- Korrektur der Höhenlage von Entwässerungsgräben im rechtsrheinischen Gebiet.
- Korrektur der Höhenlage von Speyerbach, Rehbach und Oggersheimer Altrhein.
- Einfügen zusätzlicher Entwässerungsgräben im Raum Schifferstadt.
- Änderung der Leakagefaktoren des Neckars (Abdichten im Oberstrom, Öffnen im Unterstrom der Staustufen)

Als Ergebnis der stationären Modellrechnung sind in der Karte 17b und c die berechneten Grundwassergleichen für den OGWL und den MGWL dargestellt. Weiterhin sind die Differenzen zwischen den Messwerten im Oktober 1990 und den berechneten Potenzialhöhen an den Messstellenstandorten eingetragen. Die berechneten Grundwasseraustauschmengen zwischen dem OGWL und dem MGWL sind der Karte 17d zu entnehmen.

In weiten Bereichen des OGWL ist die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen kleiner als 1 m. Bereiche mit größeren Abweichungen treten südlich von Lorsch und zwischen Speyer und Dudenhofen auf. Während der erst genannte Bereich

in den anderen stationären Rechnungen nicht mehr auftritt, ist im Gebiet Speyer vermutlich das Gewässernetz für die Abweichung verantwortlich.

Im MGWL werden die gemessenen Grundwasserstände im rechtsrheinischen Gebiet in weiten Bereichen gut wiedergegeben. Im linksrheinischen Gebiet liegen die berechneten Werte tendenziell über den gemessenen Werten. Eine Ursache für diese Abweichungen dürfte in der unterschiedlichen Vorgehensweise bei der Einstufung der Durchlässigkeit des OZH in den einzelnen Ländern liegen.

Im Raum Bürstadt/Lorsch, Ludwigshafen/Mannheim, Käfertal, Neustadt und Schwetzingen sind bedingt durch die Grundwasserentnahmen die Hauptabflussbereiche vom OGWL in den MGWL. Im Raum Speyer-Hockenheim und Brühl liegen die Hauptaufstiegsbereiche von Grundwasser aus dem MGWL in den OGWL.

Für den UGWL standen gemessene Grundwasserstände an einer Messstelle in Baden-Württemberg zur Verfügung. Die modellseitig berechnete Potenzialverteilung reproduziert den vorliegenden Messwert gut.

Insgesamt werden mit dem Modell die Hauptcharakteristiken der Grundwasserströmung in den verschiedenen Grundwasserleitern zufriedenstellend reproduziert.

7.2.3.2 Grundwasserbilanz

In Tabelle 7.1 sind die Grundwasserbilanzkomponenten für die stationäre Bezugsvariante (SBV 1990) zusammengestellt. Zum Vergleich sind die mittleren Bilanzkomponenten der stationären Bezugsvariante (1970/83) aus der vorhergehenden großräumigen Modelluntersuchung mit aufgeführt.

Tab. 7.1: **Bilanzkomponenten für mittlere Grundwasserverhältnisse im aktuellen (SBV 90) und im bisherigen (SBV 70/83) großräumigen Modell [Mio. m³/a]**

Bilanzkomponenten	aktuelles Modell SBV 1990	Modell 1985 SBV 1970/83
Grundwasserneubildung aus Niederschlag	+ 140	+ 139
Randzufluss	+ 49	+ 44
Zufluss aus Gewässer	+ 118	+ 109
Summe der Zuflüsse	+ 307	+ 292
Randabfluss	- 12	- 9
Entnahme	- 183	- 214
Abfluss in Gewässer	- 112	- 69
Summe der Abflüsse	- 307	- 292

Die größten Bilanzkomponenten auf der Zuflusseite sind die Grundwasserneubildung aus Niederschlag mit rd. 46 % und die Infiltration aus oberirdischen Gewässern mit rd. 38 %. Die wesentlichen Abflusskomponenten sind die Entnahmen mit rd. 60 % und die Grundwasser-austritte in oberirdische Gewässer mit rd. 36 % am Gesamtumsatz.

Der bei SBV 1990 im Vergleich zu SBV 1970/83 deutlich erhöhte Abfluss in die Gewässer ist eine Folge der umfangreicheren und detaillierteren Berücksichtigung der oberirdischen Gewässer im aktuellen Modell. Bei dem Vergleich der Grundwasserneubildung aus der stationären Bezugsvariante SBV 1990 mit der SBV 70/83 ist zu berücksichtigen, dass im früheren Rhein-Neckar-Modell die Fläche etwa 200 km² größer war. Bezogen auf die Fläche ist in dem aktuellen Modell für 1990 eine mittlere Grundwasserneubildung von 3,4 l/s x km² eingerechnet, während dem Fall SBV 1970/83 eine Neubildung von 2,9 l/s x km² zu Grunde lag. Die Grundwasserentnahmen 1990 liegen deutlich niedriger als im Vergleichszeitraum 1970/83. In Baden-Württemberg wurden rd. 12 Mio. m³/a in den früheren Untersuchungen für Grundwasserhaltungen angesetzt sowie Brauchwasserentnahmen für Gewerbe- und kleinere Industriebetriebe mit rd. 10 Mio. m³/a flächenverteilt berücksichtigt. Diese Entnahmen wurden nach Prüfung der Ist-Situation in die Bilanz 1990 nicht mehr aufgenommen. Darüber hinaus gingen die Gesamtentnahmen in Baden-Württemberg zwischen 1983 und 1990 zurück (vgl. Kap. 4). In Rheinland-Pfalz fielen die Brauchwasserentnahmen der Industrie von 31 Mio. m³/a (Durchschnitt 1970/83) auf 26 Mio. m³ für 1990, ebenso fielen die privaten Beregnungsentnahmen von rd. 9 Mio. m³ auf rd. 3 Mio. m³. Demgegenüber wurde im hessischen Teilgebiet 1990 rd. 3 Mio. m³ mehr Grundwasser als im Durchschnitt 1970/83 gefördert.

Für die verschiedenen Teilgebiete des Gesamttraums lassen sich ebenfalls Grundwasserbilanzen erstellen, die zur teilgebietsspezifischen Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse herangezogen werden können. In der Karte 17a sind die zur jeweiligen Teilgebietsgeometrie gehörenden Bilanzen für die stationäre Bezugsvariante (SBV 1990) tabellarisch dargestellt.

Im **Teilgebiet 1 „Westlicher Speyerbach-Schwemmfächer“** werden rd. 5 Mio. m³/a Grundwasser aus tieferen Grundwasserstockwerken entnommen, auf Grund der Potenzialunterschiede versickern rd. 3,8 Mio. m³/a vom Oberen in den Mittleren und rd. 7,0 Mio. m³/a vom Mittleren in den Unteren Grundwasserleiter. Die Oberflächengewässer nehmen nur geringe Mengen an Grundwasser auf. Von der Entnahmeseite ist das Teilgebiet maximal bewirtschaftet. Die Hauptzuflusskomponenten sind die Grundwasserneubildung aus Niederschlag mit rd. 4,1 Mio. m³/a und die unterirdischen Randzuflüsse mit rd. 9,7 Mio. m³/a.

Im **Teilgebiet 2 „Hügelland westlich der Frankenthaler Terrasse“** sind nur geringe Entnahmemengen in der Bilanz enthalten, die Potenzialdifferenzen bedingen jedoch, dass bei natürlichen Verhältnissen ein Grundwasseraustausch vom OGWL in den MGWL bzw. UGWL erfolgt. In die oberirdischen Gewässer infiltrieren rd. 1,3 Mio. m³/a Grundwasser. Die Hauptzuflusskomponenten sind die Grundwasserneubildung aus Niederschlag mit rd. 5,0 Mio. m³/a und die unterirdischen Randzuflüsse mit rd. 11,3 Mio. m³/a.

Im **Teilgebiet 3 „Niederterrasse der übrigen Haardt bäche im Bereich Haßloch-Schifferstadt-Schauernheim“** liegen die Gesamtentnahmen bei rd. 1,5 Mio. m³/a. Diese Grundwasserentnahmen werden durch die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag ausreichend gedeckt. Die Oberflächengewässer nehmen in diesem Teilgebiet eine relativ große Menge von 5,3 Mio. m³/a Grundwasser auf.

Im **Teilgebiet 4 „Südlicher Rand der Frankenthaler Terrasse und östlicher Speyerbach-Schwemmfächer“** wurden 1990 rd. 2,7 Mio. m³ Grundwasser gefördert. Die oberirdischen Gewässer infiltrieren rd. 2,5 Mio. m³/a in das Obere Grundwasser. Auf Grund der Potenzialdifferenzen versickern rd. 1,5 Mio. m³/a vom OGWL in den MGWL. Die Entnahmen werden durch die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag im Teilgebiet gedeckt.

Im **Teilgebiet 5 „Frankenthaler Terrasse und westliche Rheinniederung“ (Ludwigshafen-Frankenthal)** wird mit 13,4 und 1,5 Mio. m³/a für die Trinkwasserversorgung und durch private Beregnungsbrunnen relativ viel Grundwasser gefördert. Die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag deckt nur zur Hälfte die Entnahmemengen, wie im Teilgebiet 6 decken die Oberflächengewässer über Infiltration in den Oberen Grundwasserleiter die fehlende Dargebotsseite. Dementsprechend erfolgt auf Grund der großen Potenzialdifferenzen eine Versickerung von rd. 6,3 Mio. m³/a aus dem OGWL in den MGWL. Vom MGWL versickern rd. 6,6 Mio. m³/a in den UGWL. Die starke Belastung des Grundwasserhaushalts durch Entnahmen vorwiegend in den tieferen Stockwerken verursachte über Jahrzehnte ein Absinken des oberflächennahen Grundwasserspiegels, bekannt als „Frankenthaler Depression“. Diese Depression hat sich durch einen leichten Rückgang der Entnahmen in den vergangenen Jahren stabilisiert bzw. etwas erholt. Dagegen haben sich die Grundwasserhältnisse durch die Einstellung der Beregnungsentnahmen im Bereich der Frankenthaler Terrasse seit 1996 wieder auf Normalniveau eingestellt.

Im **Teilgebiet 6 „Rheinnaher Streifen von rd. 2 km Breite, linksrheinisch“** werden rd. 26,5 Mio. m³/a Grundwasserentnahmen für die Brauchwasserversorgung der BASF und die Trinkwassergewinnung im WW Parkinsel bilanziert. Fast 12 Mio. m³/a Grundwasser nehmen Rhein und Altrheinarme auf, rd. 13 Mio. m³/a Grundwasser versickern aber auch aus dem OGWL in den MGWL. Durch Grundwasseraustausch mit dem Rhein werden die Auswirkungen der Entnahmen gedämpft. Eine negative Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit in den tieferen Grundwasserstockwerken durch Versickerung von oberflächennahem, verunreinigten Grundwasser ist jedoch bei den bestehenden Druckverhältnissen auch zukünftig zu besorgen.

Im **Teilgebiet 7 „Rheinniederung südlich Mannheim“** wird nahezu kein Grundwasser entnommen. Hier sind im Gegensatz zum „Großraum Mannheim“ daher noch weitgehend die natürlichen Druckverhältnisse vorherrschend (vgl. Kap. 4). Dies stellt sich in der Teilgebietsbilanz durch hohe Grundwasseraustritte in oberirdische Gewässer sowie durch Grundwasserzufluss aus dem MGWL in den OGWL dar.

Im **Teilgebiet 8 „Großraum Mannheim“** ist die Entnahmekomponente mit rd. 28 Mio. m³/a im OGWL und rd. 27 Mio. m³/a im MGWL sehr hoch. Aus dem OGWL werden hier entnahmebedingt rd. 18 Mio. m³/a an den MGWL abgegeben. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag reicht hier nicht aus um die Bilanz zu decken, so dass aus den Nachbargebieten, insbesondere aus dem Teilgebiet 9 „Niederterrasse südlich des Neckars“, Grundwasser beige-

zogen wird. Trotz dieser noch immer starken Nutzung haben die oberirdischen Gewässer per Saldo eine Drainagewirkung in Höhe von rd. 11 Mio. m³/a.

Das **Teilgebiet 9 „Niederterrasse südlich des Neckars“** zeichnet sich durch eine mit rd. 34 Mio. m³/a vergleichsweise hohe Grundwasserneubildung aus Niederschlag aus. Gleichzeitig sind hier die Grundwasserentnahmen mit insgesamt rd. 28 Mio. m³/a wesentlich geringer als im benachbarten „Großraum Mannheim“, so dass per Saldo rd. 35 Mio. m³/a, insbesondere an den „Großraum Mannheim“ abgegeben werden. Rd. 22 Mio. m³/a gelangen vom OGWL in den MGWL. Dies entspricht in Bezug auf die Austauschrichtung, im Gegensatz zum Teilgebiet 8, den natürlichen Verhältnissen. Die oberirdischen Gewässer infiltrieren hier per Saldo rd. 19 Mio. m³/a.

Im **Teilgebiet 10 „Östliches Neckarschwemmland“** sind die wesentlichen Zuflusskomponenten die Grundwasserneubildung aus Niederschlag mit rd. 21 Mio. m³/a sowie die Infiltration aus oberirdischen Gewässern mit rd. 27 Mio. m³/a. Demgegenüber stehen hier Grundwasserentnahmen in Höhe von rd. 10 Mio. m³/a. Aus diesem Teilgebiet fließen im OGWL rd. 34 Mio. m³/a in benachbarte Teilgebiete, insbesondere in die Teilgebiete 8 und 12. An den MGWL werden rd. 7 Mio. m³/a abgegeben, was hier wie auch im Teilgebiet 9 hinsichtlich der Austauschrichtung den natürlichen Verhältnissen entspricht.

Im **Teilgebiet 11 „Hessische Rheinebene“** wird die Wasserbilanz vom Rhein und den rhein-nahen Gewässern als Vorfluter dominiert. Die Grundwasserneubildung und der Grundwasserzufluss von Osten her ist natürlicherweise wesentlich größer als die Entnahmen, die in der Hauptsache für die landwirtschaftliche Beregnung benötigt werden.

Im **Teilgebiet 12 „Niederterrasse der hessischen Rheinebene“** werden große Grundwassermengen entnommen. Die Entnahmen sind durch die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag und die Infiltration aus Oberflächengewässern gedeckt.

Im **Teilgebiet 13 „Aue des Altneckars“** steigt die Niederschlagshöhe wegen der Lage am Rand des Odenwaldes an, hier ist die Grundwasserneubildung relativ groß. Trotzdem reagiert das Grundwasser am Odenwaldrand recht sensibel auf Eingriffe in den Wasserhaushalt und auf Trockenperioden. Im Bereich der Weschnitz sind die Grundwasserstände relativ stabil, da hier das Gewässer in Trockenjahren erhebliche Mengen infiltriert.

7.2.4 Instationäre Langzeiteichung 1983 bis 1993

7.2.4.1 Vorgehensweise

Der Zeitraum 1983-1993 wurde mit dem Modell instationär in Jahresschritten reproduziert. In den einzelnen Zeitschritten wurden folgende Randbedingungen variiert:

Rheinwasserstand

Für jedes Jahr wurde der mittlere Rheinwasserstand berechnet und mit dem entsprechenden Gefälle im Modell vorgegeben. Neben dem Rhein wurde auch der Wasserstand im Unterlauf des Neckars bis zur ersten Staustufe angepasst.

Entnahmen

Im Modell wurden in jedem Zeitschritt, d.h. für jedes Jahr die Entnahmen entsprechend den tatsächlichen Jahresfördermengen vorgegeben.

Grundwasserneubildung

Die nach der Methode von WESSOLEK berechnete Grundwasserneubildung (Kap. 4.3.2) wurde für die einzelnen Jahre in einem 25 m Raster ermittelt und auf das 500 m-Modellraster umgesetzt.

Der Vergleich der instationär berechneten Grundwasserstände mit den gemessenen Werten zeigte, dass bei Verwendung der Originaldaten vor allem in Trockenjahren die modellseitig berechneten Potenziale tiefer als die gemessenen Grundwasserstände liegen. In den Trockenjahren 1985 und 1991 bis 1993 war bei Berücksichtigung der vorgegebenen Grundwasserneubildungsverteilung ein zu starkes Absinken der berechneten Grundwasserstände feststellbar, wohingegen die Reaktionen in hydrologisch mittleren und feuchten Jahren durch das Modell gut abgebildet wurden. Hieraus wurde gefolgert, dass die vorgegebene Grundwasserneubildung in trockenen Jahren zu gering ist.

Durch schrittweise Erhöhung der Grundwasserneubildung wurden dann die berechneten an die gemessenen Grundwasserstände angepasst. Eine gute Anpassung wurde erzielt, nachdem in den Trockenjahren die Bereiche mit negativen Neubildungswerten einheitlich auf eine geringe positive Neubildung (30 mm/a) korrigiert wurden.

Die Jahressummen der Grundwasserneubildung liegen zwischen rd. 295 Mio. m³ im Nassjahr 1983 und rd. 65 bzw. 57 Mio. m³ in den Trockenjahren 1991 und 1993. Die mittlere Neubildung im Untersuchungszeitraum liegt bei rd. 155 Mio. m³/a. Das Jahr 1983 war im bisherigen Rhein-Neckar-Modell ebenfalls enthalten. Für die etwas größere Gebietsfläche wurde seinerzeit eine deutlich niedrigere Grundwasserneubildung von 234 Mio. m³/a vorgegeben.

Randzuflüsse

Der unterirdische Randzu- bzw. abfluss wurde für die instationäre Eichung aus der stationären Eichung für die einzelnen Grundwasserleiter übernommen und zeitlich nicht variiert.

Modellergebnisse

Zur differenzierten Bewertung der Grundwasserstandsentwicklung wurde das Untersuchungsgebiet in Anlehnung an die frühere Untersuchung in 13 Teilgebiete aufgeteilt (Karte 17a).

Die Grundwassermessstellen wurden getrennt nach OGWL und MGWL den Teilgebieten zugeordnet. Alle Grundwasserstandsmessungen in einem Teilgebiet (Mittelwerte aller Messwerte im Teilgebiet) werden dann zu einem Jahresmittelwert zusammengefasst. Die Jahresmittelwerte eines Teilgebietes bilden die „gemessene“ Gebietsganglinie. Diese wird der „berechneten“ Gebietsganglinie (Mittelwert aus allen Modellknoten im Teilgebiet) gegenübergestellt.

7.2.4.2 Analyse der Grundwasserstände in maßgebenden Teilgebieten

Da sich die Entnahmen im Betrachtungszeitraum nur in geringem Umfang geändert haben, wurde die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände vor allem durch den Rheinwasserstand und die Grundwasserneubildung bestimmt. Folgendes kann bei der Betrachtung der gemessenen und berechneten Werten in den Abbildungen 7.4 bis 7.16 (Teilgebiete 1 bis 13) festgestellt werden:

- In den Teilgebieten 1 bis 5 liegen die berechneten Grundwasserstände gegen Ende des Betrachtungszeitraums tiefer als die Messwerte. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Grundwasserneubildung in den trockenen Jahren in diesem Bereich noch etwas höher liegt als angesetzt. Der Neubildungseinfluss ist rechtsrheinisch deutlicher ausgeprägt als linksrheinisch. Während z.B. im Teilgebiet 4 die Grundwasserstände Mitte der 80er und Anfang der 90er Jahre etwa um 0,5 m absinken, beträgt die Differenz im Teilgebiet 9 ca. 1,0 m.
- In den überwiegend vom Rhein beeinflussten Teilgebieten 6, 7, 8 und 11 stimmen die berechneten und gemessene Grundwasserstände im OGWL und MGWL sowohl im zeitlichen Verlauf als auch in der Amplitude gut überein.
- In den mehr von der Grundwasserneubildung beeinflussten rechtsrheinischen Teilgebieten 9, 10, 12 und 13 werden die gemessenen Werte, speziell das Absinken der Grundwasserstände in Folge der Trockenperiode 1990-1993 gut wiedergegeben.
- Bei der Bewertung der Ergebnisse im MGWL muss berücksichtigt werden, dass in einigen Teilgebieten nur wenige Messstellen zur Bildung des Gebietsmittels zur Verfügung stehen. Insgesamt wird aber auch der zeitliche Verlauf der Grundwasserstände im MGWL gut wiedergegeben.

Abb. 7.4: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 1

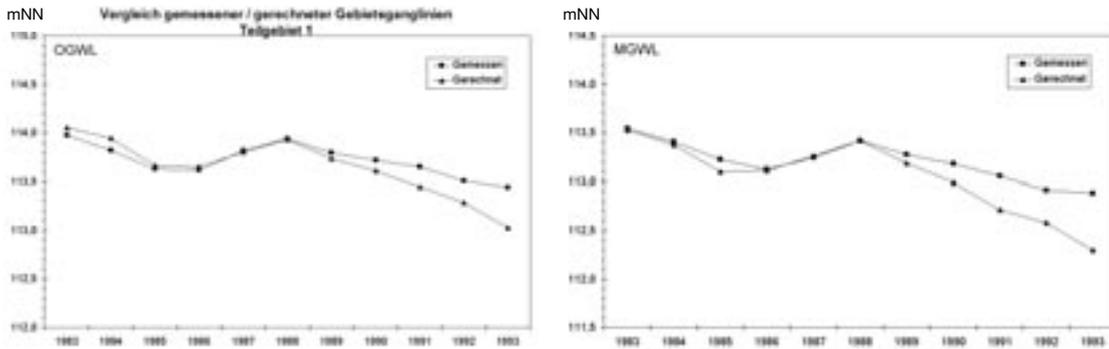


Abb. 7.5: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 2

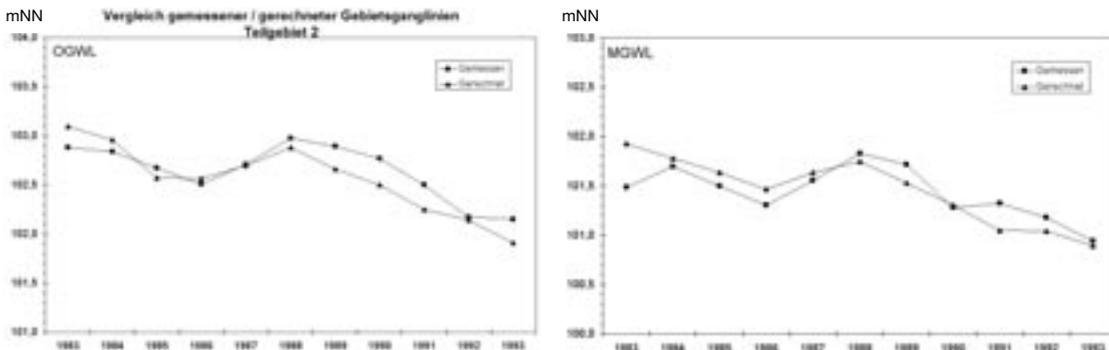


Abb. 7.6: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 3

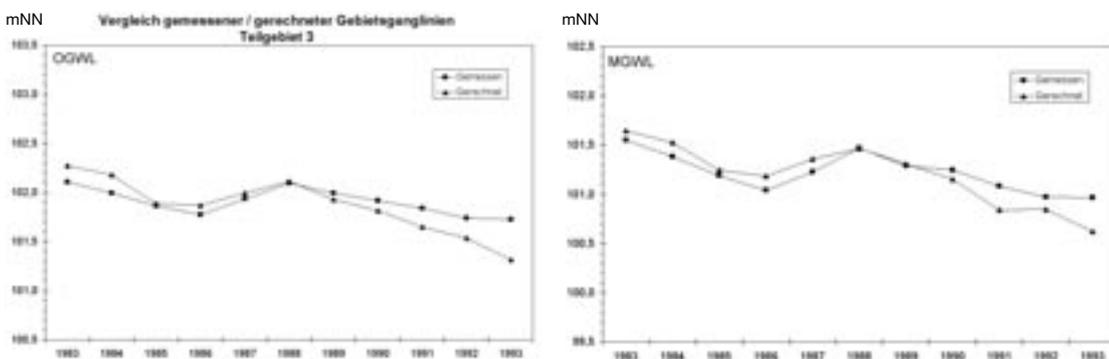


Abb. 7.7: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 4

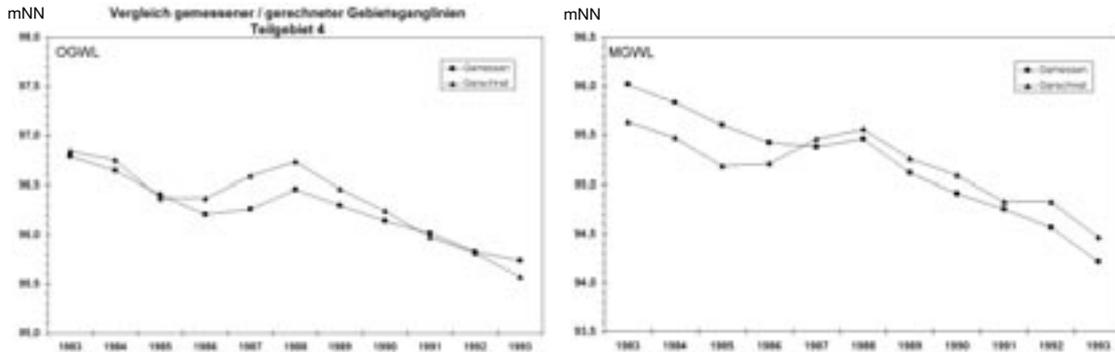


Abb. 7.8: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 5

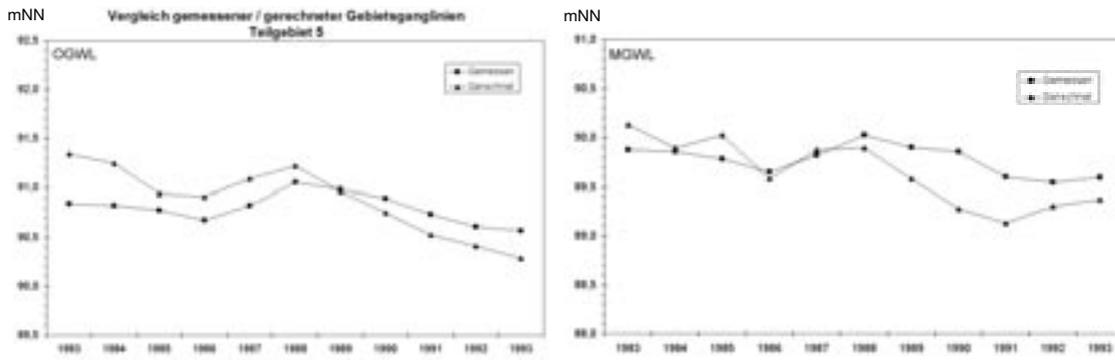


Abb. 7.9: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 6

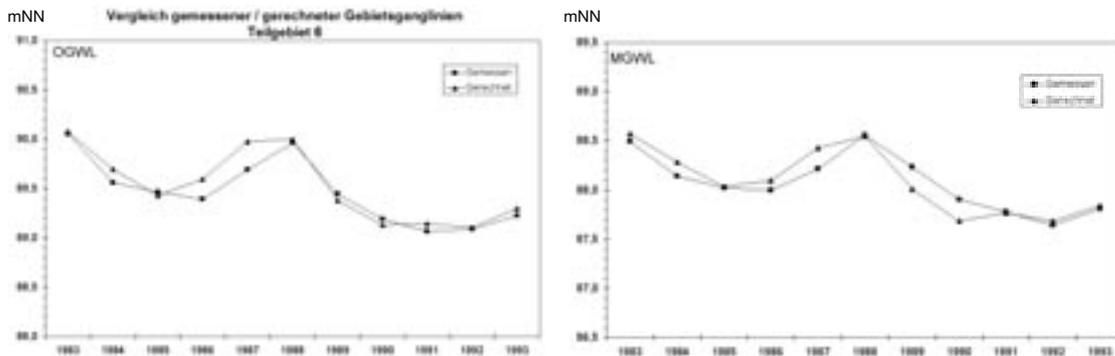


Abb.7.10: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 7

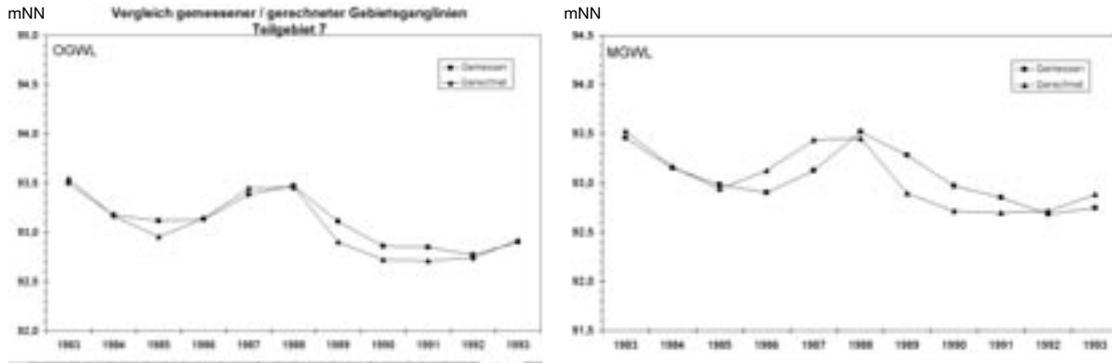


Abb.7.11: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 8

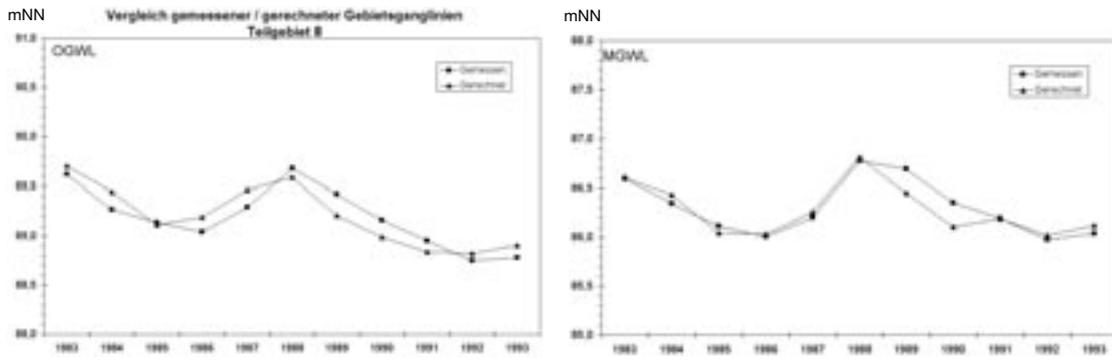


Abb.7.12: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 9

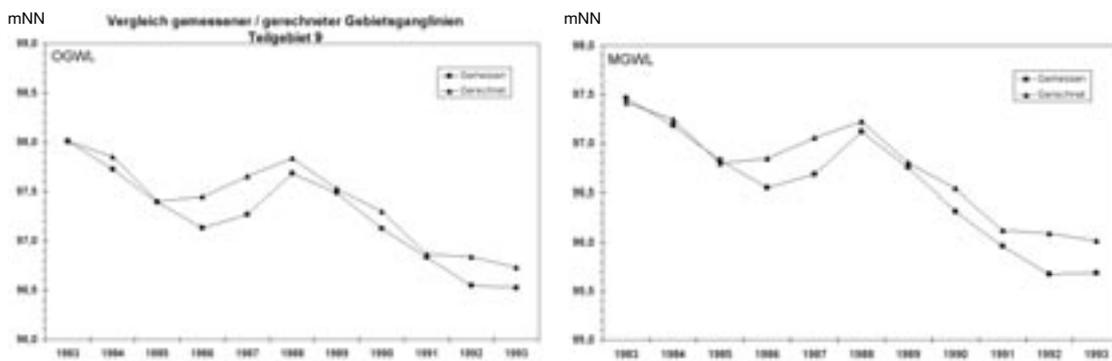


Abb.7.13: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 10

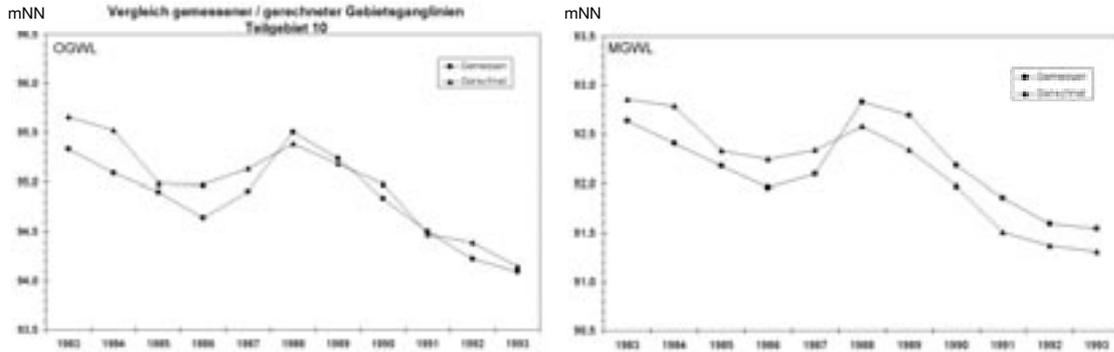


Abb.7.14: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 11

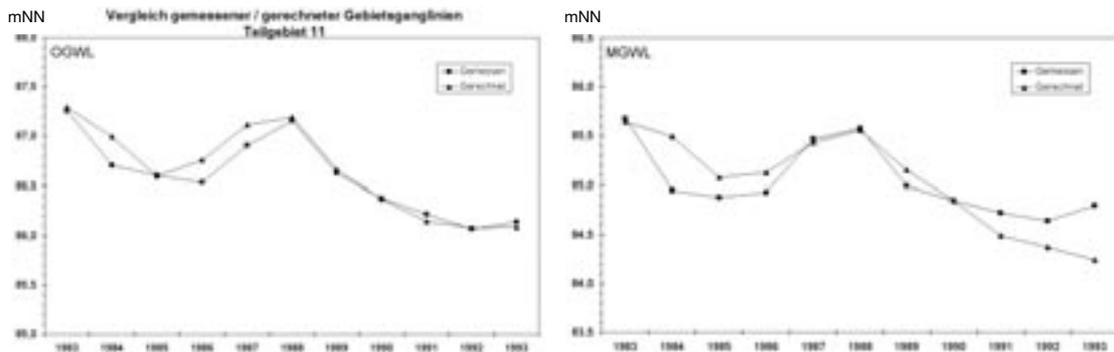


Abb.7.15: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 12

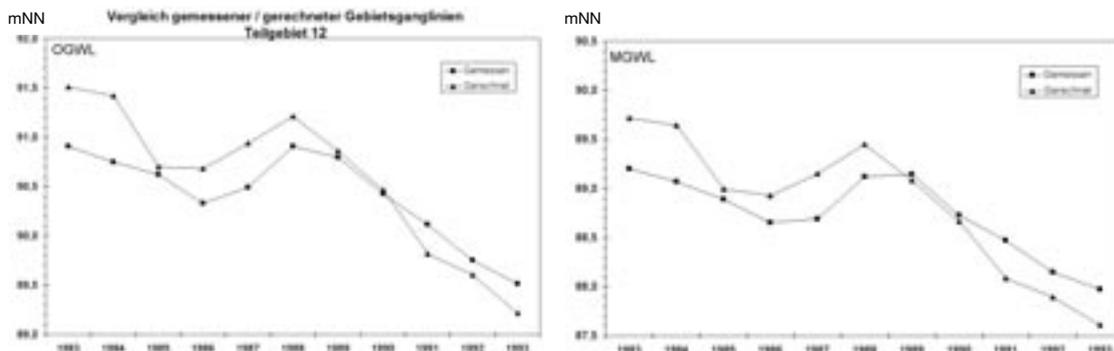
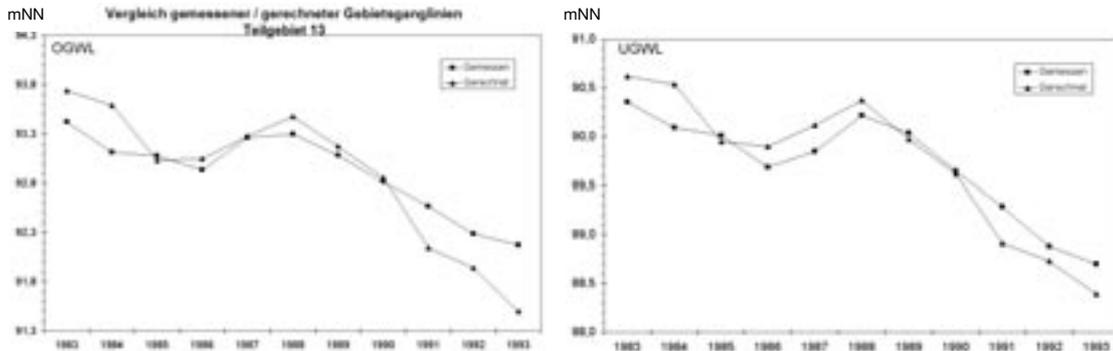


Abb.7.16: Vergleich der „gemessenen und gerechneten“ Gebietsganglinien im OGWL und MGWL für das Teilgebiet 13



7.2.4.3 Grundwasserbilanz

In Tabelle 7.2 sind die Bilanzgrößen für die instationäre Rechnung 1983/93 zusammengestellt. Zuflüsse zum Grundwasser sind mit positivem Vorzeichen, Abflüsse mit negativem Vorzeichen gekennzeichnet. Zum Vergleich mit den Jahresmittelwerten sind die Mittelwerte (MW 1983/93) der Bilanzkomponenten für die gesamte Berechnungszeitspanne 1983 bis 1993 angegeben.

Tab. 7.2: Bilanzkomponenten aus der instationären Langzeiteichung 1983-1993 des großräumigen Grundwassermodells [Mio. m³]

Jahr	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	MW 1983/93
Grundwassereu- bildung aus Niederschlag	295	195	85	167	214	234	139	130	65	102	57	153
Randzufluss	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Zufluss aus den Gewässern	112	95	109	114	116	101	96	105	121	122	137	112
Speicherent- leerung	0	19	74	0	0	0	66	46	60	17	25	28
Summe der Zuflüsse	456	358	317	330	379	384	350	330	295	290	268	342
Abfluss in die Gewässer	-148	-168	-127	-125	-138	-164	-158	-135	-104	-103	-85	-132
Randabfluss	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
Entnahme	-176	-178	-178	-181	-179	-176	-180	-183	-179	-175	-171	-178
Speicherfüllung	-120	0	0	-12	-50	-32	0	0	0	0	0	-19
Summe der Abflüsse	-456	-358	-317	-330	-379	-384	-350	-330	-295	-290	-268	-342
Speicher- änderung	-120	19	74	-12	-50	-32	66	46	60	17	25	8

Die größte Schwankungsbreite aller Bilanzgrößen zeigt die Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Diese kann in einem Nassjahr wie z. B. 1983 rd. das 5-fache der Neubildung von einem Trockenjahr erreichen. Der Zufluss aus den oberirdischen Gewässern – maßgebend sind Rhein und Neckar – erreicht im Mittel zwischen 1983 und 1993 rd. 112 Mio. m³/a. Der Abfluss von Grundwasser in die Gewässer war im Betrachtungszeitraum rd. 20 Mio. m³/a höher als die Infiltration aus Gewässern. Die Grundwasserentnahmen änderten sich zwischen 1983 und 1993 nur geringfügig und lagen im Durchschnitt bei rd. 178 Mio. m³/a. Die Bilanz wurde in den einzelnen Jahren durch Speicherentleerung- bzw. -füllung ausgeglichen. Durch die trockenen Jahre erfolgte über den Gesamtzeitraum eine Speicherentleerung, die in der Summe rd. 91 Mio. m³ erreichte.

Für die verschiedenen Teilgebiete des Gesamtraums lassen sich wiederum Grundwasserbilanzen erstellen, die zur teilgebietsspezifischen Charakterisierung der Grundwasserhältnisse während der Zeitspanne 1983 bis 1993 herangezogen werden können. In der Karte 17a sind die zum jeweiligen Teilgebiet gehörenden Bilanzen für mittlere Verhältnisse (SBV 1990) dargestellt. Für die nachfolgende Beschreibung der zeitlich veränderlichen Grundwasserbilanzverhältnisse werden die beiden Jahre 1983 und 1993 herausgegriffen, die sich insbesondere hinsichtlich der hydrologischen Situation deutlich unterscheiden.

Vergleich der Grundwasserbilanzen in den Teilgebieten 1 bis 13 zwischen dem Nassjahr 1983 und dem Trockenjahr 1993 [Mio. m³]:

Im **Teilgebiet 1 „Westlicher Speyerbach-Schwemmfächer“** wird besonders der Einfluss der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Bilanzbetrachtung deutlich. Im Nassjahr 1983 wurden 14,7 Mio. m³ Grundwasser neugebildet, im Trockenjahr 1993 hingegen gab es eine negative Neubildungssumme von -1,5 Mio. m³, dementsprechend musste das Grundwasser 1993 durch Infiltration aus den Oberflächengewässern gestützt werden.

Teilgebiet 1 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	-1,1	-3,7	-4,7	0,0	-1,3	-3,7	-5,0
Beregnung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GW-Neubildung	14,7	0,0	0,0	14,7	-1,5	0,0	0,0	-1,5
Randzufluss	2,3	7,3	0,0	9,7	2,3	7,3	0,0	9,7
Gewässeraustausch	-7,2	0,0	0,0	-7,2	2,5	0,0	0,0	2,5
Austausch oben		3,6	6,9	10,5		3,8	6,9	10,8
Austausch unten	-3,6	-6,9		-10,5	-3,8	-6,9		-10,8
Austausch horizontal	-2,6	-3,0	-3,2	-8,8	-2,4	-3,0	-3,2	-8,6
Speicher	-3,7	0,0	0,0	-3,7	3,0	0,0	0,0	3,0
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 2 „Hügelland westlich der Frankenthaler Terrasse“** ist ebenfalls die GW-Neubildung die maßgebende Bilanzkomponente für die Betrachtung unterschiedlicher meteorologischer Zeiträume. 1983 betrug die GW-Neubildung das 19-fache gegenüber 1993, die Oberflächengewässer erfolgten nur noch 7 % Grundwasserzusickeung im Vergleich zu 1983.

Teilgebiet 2 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1
Beregnung	-0,3	0,0	0,0	-0,3	-0,5	0,0	0,0	-0,5
GW-Neubildung	13,5	0,0	0,0	13,5	0,7	0,0	0,0	0,7
Randzufluss	3,9	7,5	0,0	11,3	3,9	7,5	0,0	11,3
Gewässeraustausch	-4,5	0,0	0,0	-4,5	-0,3	0,0	0,0	-0,3
Austausch oben		1,7	3,5	5,2		1,4	3,4	4,8
Austausch unten	-1,7	-3,5		-5,2	-1,4	-3,4		-4,8
Austausch horizontal	-7,3	-5,6	-3,5	-16,3	-4,8	-5,4	-3,4	-13,6
Speicher	-3,6	0,0	0,0	-3,7	2,4	0,0	0,0	2,4
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 3 „Niederterrasse der übrigen Haardt bäche im Bereich Haßloch-Schifferstadt-Schauernheim“** sind wie in den v. g. Teilgebieten die Bilanzkomponenten GW-Neubildung und Gewässeraustausch maßgebend. 1993 ist die GW-Neubildung gleich Null, die Infiltration von Grundwasser in die Gewässer sinkt von 11,2 auf 3,0 Mio. m³/a.

Teilgebiet 3 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	-0,8	-0,6	-1,4	0,0	-1,0	-0,8	-1,8
Beregnung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GW-Neubildung	11,1	0,0	0,0	11,1	-0,6	0,0	0,0	-0,6
Randzufluss	1,2	2,2	0,0	3,4	1,2	2,2	0,0	3,4
Gewässeraustausch	-11,2	0,0	0,0	-11,2	-3,0	0,0	0,0	-3,0
Austausch oben		0,7	0,6	1,2		0,7	0,6	1,3
Austausch unten	-0,7	-0,6		-1,2	-0,7	-0,6		-1,3
Austausch horizontal	2,3	-1,4	0,0	0,9	1,0	-1,3	0,2	-0,1
Speicher	-2,7	0,0	0,0	-2,8	2,0	0,0	0,0	2,1
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 4 „Südlicher Rand der Frankenthaler Terrasse und östlicher Speyerbach-Schwemmfächer“** ist neben der Reduzierung der GW-Neubildungsmenge und der Feststellung, dass 1993 die Oberflächengewässer ins Grundwasser infiltrieren, markant, dass rd. 2,5 Mio. m³/a weniger Grundwasser in Nachbargebiete abfließt.

Teilgebiet 4 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-0,6	-2,0	-0,6	-3,2	-0,7	-2,1	-1,0	-3,8
Beregnung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GW-Neubildung	15,0	0,0	0,0	15,0	1,6	0,0	0,0	1,6
Randzufluss	0,0	-2,8	0,0	-2,8	0,0	-2,8	0,0	-2,8
Gewässeraustausch	-1,0	0,0	0,0	-1,0	2,9	0,0	0,0	2,9
Austausch oben		1,8	-0,5	1,2		1,5	-0,5	1,1
Austausch unten	-1,8	0,5		-1,2	-1,5	0,5		-1,1
Austausch horizontal	-6,8	2,5	1,1	-3,2	-5,1	2,9	1,4	-0,7
Speicher	-4,8	0,0	0,0	-4,9	2,8	0,0	0,0	2,8
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 5 „Frankenthaler Terrasse und westliche Rheinniederung“ (Ludwigshafen-Frankenthal)** geht die GW-Neubildung von 21,6 Mio. m³ im Jahr 1983 auf Null im Jahr 1993 zurück! Während 1983 die Gewässer noch 8,2 Mio. m³ Grundwasseraufnahmen, infiltrierten 1993 die Gewässer 1,6 Mio. m³ Oberflächenwasser zur Stützung des Grundwasserhaushalts, d.h. in Trockenzeiten infiltriert der Rhein in den Bereich der „Frankenthaler Depression“ ins Obere Grundwasser.

Teilgebiet 5 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	-6,0	-5,7	-11,7	0,0	-5,0	-5,8	-10,7
Beregnung	-1,5	0,0	0,0	-1,5	-2,1	0,0	0,0	-2,1
GW-Neubildung	21,6	0,0	0,0	21,6	-0,1	0,0	0,0	-0,1
Randzufluss	1,3	1,9	0,0	3,2	1,3	1,9	0,0	3,2
Gewässeraustausch	-8,2	0,0	0,0	-8,2	1,6	0,0	0,0	1,6
Austausch oben		5,3	5,4	10,7		4,1	5,4	9,5
Austausch unten	-5,3	-5,4		-10,7	-4,1	-5,4		-9,5
Austausch horizontal	0,1	4,3	0,4	4,7	0,9	4,4	0,4	5,6
Speicher	-8,0	-0,1	-0,1	-8,1	2,5	0,0	0,0	2,5
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 6 „Rheinnaher Streifen von rd. 2 km Breite, linksrheinisch“** werden die höchsten Entnahmen mit rd. 25 Mio. m³/a getätigt. Während in Nasszeiten rd. 18 Mio. m³/a Grundwasser in den Rhein und seine Altrheinarme infiltriert, stützt der Rhein in Trockenzeiten den OGWL und gibt, wie im Teilgebiet 5, Oberflächenwasser ins Grundwasser ab.

Ebenso vermindert sich der unterirdische, horizontale Abfluss in benachbarte Teilgebiete von 32,8 auf 28,3 Mio. m³/a.

Teilgebiet 6 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-0,2	-17,7	-6,9	-24,8	-1,0	-17,5	-7,1	-25,6
Beregnung	-0,3	0,0	0,0	-0,3	-0,5	0,0	0,0	-0,5
GW-Neubildung	17,2	0,0	0,0	17,2	-0,2	0,0	0,0	-0,2
Randzufluss	0,2	0,9	0,0	1,0	0,2	0,9	0,0	1,0
Gewässeraustausch	-17,9	0,0	0,0	-17,9	0,2	0,0	0,0	0,2
Austausch oben		11,7	2,1	13,8		11,8	2,2	13,9
Austausch unten	-11,7	-2,1		-13,8	-11,8	-2,2		-13,9
Austausch horizontal	20,6	7,3	4,9	32,8	16,3	7,0	4,9	28,3
Speicher	-7,9	-0,1	0,0	-8,0	-3,3	0,0	0,0	-3,3
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 7 „Rheinniederung südlich Mannheim“** lag 1983 eine überdurchschnittlich hohe Grundwasserneubildung vor, die rd. 4 mal höher als die des Trockenjahres 1993 war. Demzufolge waren 1983 die Grundwasseraustritte in die Gewässer überdurchschnittlich hoch. Die Austauschbilanz Gewässer/Grundwasser wies 1983 einen Grundwasserabfluss von rd. 24 Mio. m³/a und 1993 von rd. 9 Mio. m³/a aus. Auch in sehr trockenen Jahren wie z.B. 1993 erhalten hier die Gewässer einen nennenswerten Grundwasserzufluss. Sowohl 1983 als auch 1993 erfährt der OGWL einen Grundwasserzufluss aus dem MGWL.

Teilgebiet 7 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1
Beregnung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GW-Neubildung	10,4	0,0	0,0	10,4	2,7	0,0	0,0	2,7
Randzufluss	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8
Gewässeraustausch	-23,7	0,0	0,0	-23,7	-8,8	0,0	0,0	-8,8
Austausch oben		-5,0	-0,7	-5,7		-2,8	-0,3	-3,1
Austausch unten	5,0	0,7		5,7	2,8	0,3		3,1
Austausch horizontal	10,4	3,6	0,7	14,7	4,4	1,8	0,3	6,5
Speicher	-2,1	0,0	0,0	-2,1	-1,1	0,0	0,0	-1,1
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Auch im **Teilgebiet 8 „Großraum Mannheim“** lag 1983 mit rd. 23 Mio. m³ eine überdurchschnittlich hohe Grundwasserneubildung vor, die rd. 3,5 mal höher als die des Trockenjahres 1993 war. Die Austauschbilanz Gewässer/Grundwasser wies 1983 einen Grundwasserabfluss von rd. 12 Mio. m³/a und 1993 von rd. 5 Mio. m³/a aus. Sowohl 1983 als auch 1993 stellt der Grundwasserabfluss aus dem OGWL in den MGWL mit rd. 19 bzw. 16 Mio. m³ eine wesentliche, entnahmebeeinflusste Bilanzkomponente dar. In diesem Zeitraum ist auch die Entnahmekomponente zwischen 1983 und 1993 im OGWL und im MGWL mit insgesamt rd. 28 % überproportional (rd. 9 % im gesamten baden-württembergischen Teil) zurückgegangen, was u. a. zu geringeren Zuflüssen aus Nachbargebieten und im OGWL zu geringeren Abflüssen in den MGWL führte.

Teilgebiet 8 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-33,5	-29,9	-0,8	-64,1	-25,2	-24,4	-0,5	-50,0
Beregnung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GW-Neubildung	22,9	0,0	0,0	22,9	6,4	0,0	0,0	6,4
Randzufluss	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gewässeraustausch	-12,3	0,0	0,0	-12,3	-5,5	0,0	0,0	-5,5
Austausch oben		18,6	-0,9	17,7		15,9	-0,3	15,6
Austausch unten	-18,6	0,9		-17,7	-15,9	0,3		-15,6
Austausch horizontal	49,7	10,4	1,7	61,7	42,1	8,1	0,9	51,0
Speicher	-8,2	0,0	0,0	-8,3	-1,9	0,0	0,0	-1,9
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Das **Teilgebiet 9 „Niederterrasse südlich des Neckars“** zeichnet sich durch eine generell hohe Grundwasserneubildung aus Niederschlag aus. Diese war 1983 mit rd. 60 Mio. m³/a 3 mal höher als im Trockenjahr 1993. Bei der Wechselwirkung zwischen Gewässern und dem Grundwasser besteht daher zwischen 1983 und 1993 ein signifikanter Unterschied. 1983 war die Austauschbilanz Gewässer/Grundwasser mit rd. 2 Mio. m³/a nahezu ausgeglichen, wohingegen im Jahr 1993 die Gewässerinfiltrationen die Grundwasseraustritte um rd. 24 Mio. m³/a übertrafen, da aufgrund des tiefer liegenden Grundwasserspiegels verstärkt Oberflächenwasser mobilisiert wurde. 1993 lag der Grundwasserabfluss vom OGWL in den MGWL mit 21,1 Mio. m³/a rd. 5,5 Mio. m³/a über demjenigen im Jahr 1983. Dies wurde im wesentlichen durch die Veränderung der Entnahmesituation, (Rückgang im OGWL Zunahme im MGWL) hervorgerufen.

Teilgebiet 9 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-18,5	-1,7	0,0	-20,2	-15,4	-12,0	0,0	-27,4
Beregnung	-0,5	0,0	0,0	-0,5	-0,5	0,0	0,0	-0,5
GW-Neubildung	59,7	0,0	0,0	59,7	20,0	0,0	0,0	20,0
Randzufluss	13,0	0,0	0,0	13,0	13,0	0,0	0,0	13,0
Gewässeraustausch	2,2	0,0	0,0	2,2	23,6	0,0	0,0	23,6
Austausch oben		15,6	1,3	16,9		21,1	0,8	21,9
Austausch unten	-15,6	-1,3		-16,9	-21,1	-0,8		-21,9
Austausch horizontal	-29,4	-12,5	-1,3	-43,2	-23,0	-8,3	-0,8	-32,1
Speicher	-10,9	-0,1	0,0	-10,9	3,4	0,0	0,0	3,4
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Auch im **Teilgebiet 10 „Östliches Neckarschwemmland“** war die Grundwasserneubildung aus Niederschlag 1983 mit rd. 35 Mio. m³/a überdurchschnittlich hoch und rd. 2,5 mal höher als 1993. Demzufolge weist die Austauschbilanz Gewässer/Grundwasser im Trockenjahr 1993 eine um 7 Mio. m³/a höhere Infiltration aus oberirdischen Gewässern als im Nassjahr 1983 aus. Die Entnahmen im OGWL sind von 1983 bis 1993 um rd. 3 Mio. m³/a zurückgegangen und im MGWL um rd. 2 Mio. m³/a angestiegen. Aufgrund dessen hat sich der Abfluss aus dem OGWL in den MGWL leicht erhöht.

Teilgebiet 10 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-10,5	-6,6	0,0	-17,1	-7,2	-8,2	0,0	-15,5
Beregnung	-0,5	0,0	0,0	-0,5	-0,5	0,0	0,0	-0,5
GW-Neubildung	35,3	0,0	0,0	35,3	13,5	0,0	0,0	13,5
Randzufluss	3,0	1,4	0,0	4,4	3,0	1,4	0,0	4,4
Gewässeraustausch	21,6	0,0	0,0	21,6	28,6	0,0	0,0	28,6
Austausch oben		5,9	0,5	6,4		6,5	0,4	7,0
Austausch unten	-5,9	-0,5		-6,4	-6,5	-0,4		-7,0
Austausch horizontal	-37,4	0,0	-0,5	-37,9	-34,9	0,8	-0,5	-34,5
Speicher	-5,7	-0,1	0,0	-5,8	4,0	0,0	0,0	4,0
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 11 „Hessische Rheinebene“** wird die Wasserbilanz vom Rhein und den rhein-nahen Gewässern als Vorfluter dominiert. In dem Nassjahr 1983 flossen 14,5 Mio. m³ ab, in Trockenjahren ist bei niedrigen Grundwasserständen auch mit der Infiltration aus Gewässern in das Grundwasser zu rechnen. Die Grundwasserentnahme wird in der Hauptsache für die landwirtschaftliche Beregnung benötigt. Die ohnehin geringe Grundwasserneubildung fällt in diesem Gebiet in Trockenjahren besonders niedrig aus.

Teilgebiet 11 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,2
Beregnung	-2,2	0,0	0,0	-2,2	-2,2	0,0	0,0	-2,2
GW-Neubildung	20,5	0,0	0,0	20,5	2,5	0,0	0,0	2,5
Randzufluss	-1,0	-0,6	-1,6	-3,2	-1,0	-0,6	-1,6	-3,2
Gewässeraustausch	-14,5	0,0	0,0	-14,5	1,3	0,0	0,0	1,3
Austausch oben		1,3	1,3	2,7		2,1	1,4	3,6
Austausch unten	-1,3	-1,3		-2,7	-2,1	-1,4		-3,6
Austausch horizontal	4,6	0,6	0,4	5,6	1,6	-0,1	0,3	1,8
Speicher	-6,1	0,0	0,0	-6,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 12 „Niederterrasse der hessischen Rheinebene“** werden große Grundwassermengen entnommen. Ein Teil wird direkt in dem Gebiet gewonnen; ein weiterer Teil fließt hauptsächlich aus dem Mittleren Grundwasserleiter aus dem Teilgebiet ab. In Nassjahren wird die Bilanz durch die Neubildung ausgeglichen und der Speicher gefüllt; in Trockenjahren findet eine Speicherzehrung statt. Infolge des daraufhin sinkenden Grundwasserstandes verstärken sich der horizontale Zustrom aus dem Westen und die Zusickerung aus den Gewässern. Da die negative Bilanz mit der Speicherzehrung von 7,8 Mio. m³ im Jahr 1993 in diesem Teilgebiet am größten ist, besteht hier auch am ehesten die Gefahr einer Überföderung in Trockenperioden.

Teilgebiet 12 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-3,1	-13,9	0,0	-17,0	-3,6	-13,3	0,0	-16,9
Beregnung	-1,6	0,0	0,0	-1,6	-1,6	0,0	0,0	-1,6
GW-Neubildung	37,9	0,0	0,0	37,9	6,8	0,0	0,0	6,8
Randzufluss	-2,3	-1,9	0,0	-4,2	-2,3	-1,9	0,0	-4,2
Gewässeraustausch	2,2	0,0	0,0	2,2	3,6	0,0	0,0	3,6
Austausch oben		22,4	1,0	23,4		19,1	0,3	19,3
Austausch unten	-22,4	-1,0		-23,4	-19,1	-0,3		-19,3
Austausch horizontal	1,2	-5,5	-0,9	-5,2	8,4	-3,5	-0,3	4,5
Speicher	-12,0	-0,1	0,0	-12,1	7,8	0,0	0,0	7,8
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

Im **Teilgebiet 13 „Aue des Altneckars“** steigt die Niederschlagshöhe wegen der Lage am Rand des Odenwaldes an, hier ist die Grundwasserneubildung relativ groß. Die Grundwasserentnahme erfolgt nicht nur durch Brunnen in dem Gebiet, es erfolgt auch ein Abstrom im Mittleren Grundwasserleiter in andere Teilgebiete.

Teilgebiet 13 Bilanzgröße	1983				1993			
	OGWL	MGWL	UGWL	Summe	OGWL	MGWL	UGWL	Summe
GW-Entnahmen	-0,1	-2,8	0,0	-2,9	-2,0	-2,7	0,0	-4,6
Beregnung	-1,3	0,0	0,0	-1,3	-1,3	0,0	0,0	-1,3
GW-Neubildung	14,8	0,0	0,0	14,8	4,7	0,0	0,0	4,7
Randzufluss	0,4	-0,1	0,0	0,3	0,4	-0,1	0,0	0,3
Gewässeraustausch	-1,3	0,0	0,0	-1,3	5,0	0,0	0,0	5,0
Austausch oben		3,9	0,2	4,2		3,9	0,2	4,1
Austausch unten	-3,9	-0,2		-4,2	-3,9	-0,2		-4,1
Austausch horizontal	-5,4	-0,8	-0,2	-6,3	-5,8	-0,9	-0,2	-6,9
Speicher	-3,2	0,0	0,0	-3,2	2,8	0,0	0,0	2,8
Summe	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	

7.2.5 Prognoseberechnung für das Jahr 2010

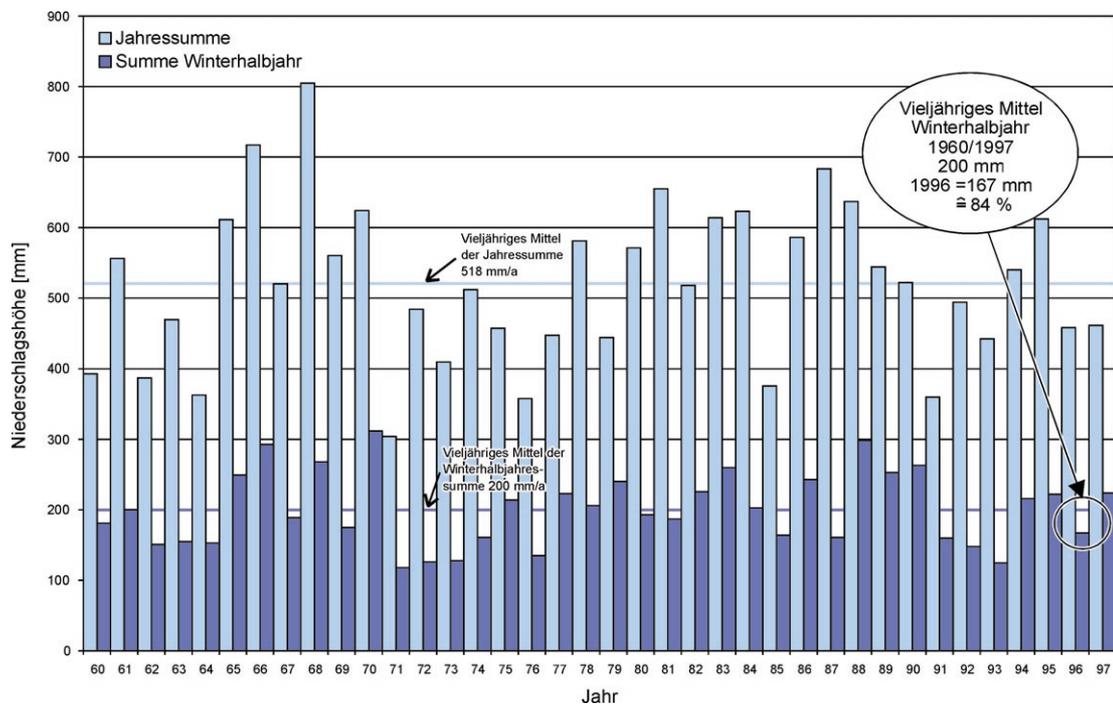
7.2.5.1 Modellüberprüfung 1996 (VER 1996)

Um einen möglichst aktuellen Entnahmestand (Jahr 1996) als Ausgangszustand für die Prognoseberechnungen zu berücksichtigen wurde der Oktober 1996 als weitere Referenzsituation für die Modellüberprüfung (Verifikation, VER 1996) herangezogen. Im stationären Modell wurden dabei folgende Randbedingungen gegenüber der stationären Bezugsvariante (SBV 1990) verändert:

- Jahressummen der Grundwasserentnahmen 1996
- modifizierte mittlere Grundwasserneubildung
- Wasserstand der oberirdischen Hauptgewässer Rhein und Neckar aus Pegeldaten (Mittel der Jahresreihe 1983-1993)

Abbildung 7.17 zeigt exemplarisch die Jahresniederschläge und die Winterniederschläge an der Station Frankenthal. 1996 waren die Winterniederschläge um ca. 15 % niedriger als im vieljährigen Mittel. Es wurde daher davon ausgegangen, dass dementsprechend auch die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen im Jahr 1996 etwa 15 % unter der mittleren Neubildung liegt. Für den Ausgangszustand 1996 wurden daher 85 % der mittleren Grundwasserneubildung angesetzt.

Abb. 7.17: Niederschlagssummen 1960 bis 1997 an der Station Frankenthal/Pfalz



Der Vergleich der Bilanzkomponenten für die beiden stationären Modellberechnungen SBV 1990 und VER 1996 in Tabelle 7.3 zeigt, dass sich im Trockenjahr 1996 die verminderte Grundwasserneubildung (-21 Mio. m³) und die geringeren Entnahmen (-21 Mio. m³) gegenüber 1990 ausgleichen, weshalb die anderen Bilanzkomponenten nahezu unverändert bleiben.

Tab.7.3: Bilanzkomponenten der stationären Bezugsvariante 1990 (SBV 90) und der Verifikation 1996 (VER 96) [Mio. m³]

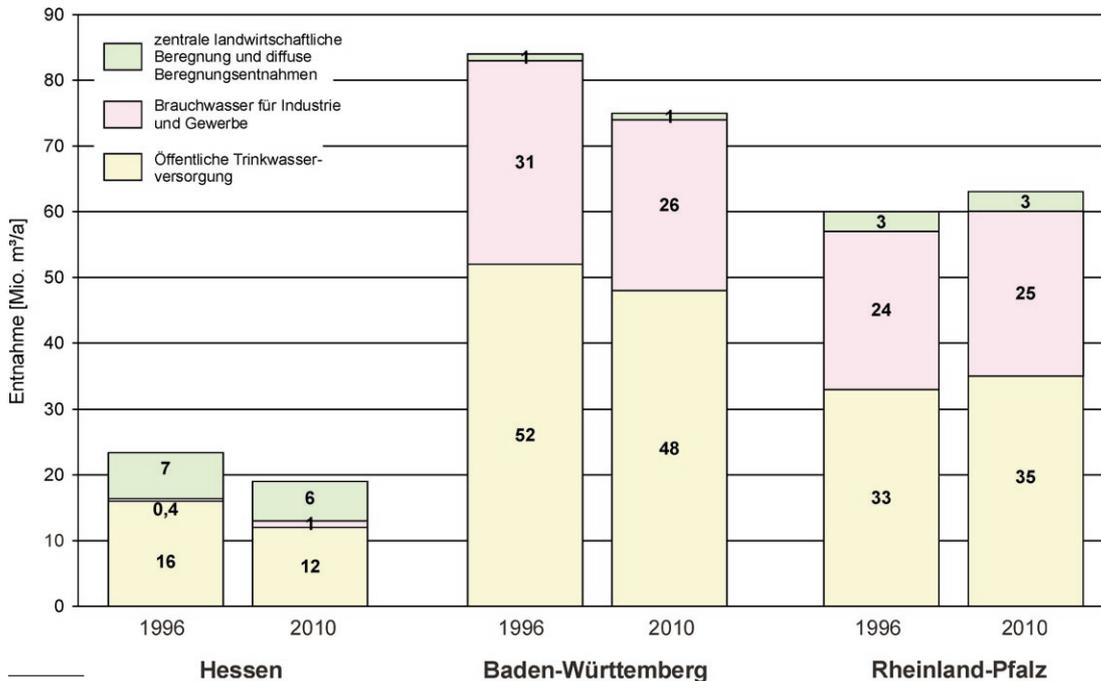
Bilanzkomponenten	aktuelles Modell SBV 1990	aktuelles Modell VER 1996
Grundwasserneubildung aus Niederschlag	+ 140	+ 119
Randzufluss	+ 49	+ 49
Zufluss aus Gewässern	+ 118	+ 117
Summe der Zufüsse	+ 307	+ 285
Randabfluss	- 12	-12
Abfluss in Gewässer	- 112	- 110
Entnahme	- 183	- 163
Summe der Abflüsse	- 307	- 285

Insgesamt konnten für das Jahr 1996 die gemessenen Grundwasserstände im OGWL und MGWL zufriedenstellend mit dem Modell reproduziert werden (Karte 18a und b), d.h. das Modell ist in der Lage mit veränderten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Randbedingungen realistisch die großräumigen Grundwasserverhältnisse zu berechnen.

7.2.5.2 Prognosevariante 2010

Das angepasste und überprüfte stationäre Grundwasserströmungsmodell wurde zur Untersuchung der für 2010 prognostizierten Entnahmen eingesetzt. Hierzu wurde aufbauend auf der Modellüberprüfung VER 1996 mit vieljährig mittlerer Grundwasserneubildung wie in SBV 1990 der Ausgangszustand AUS 1996 erstellt. Die Änderungen der berechneten Grundwasserstände der Prognosevariante 2010 wurden in Bezug zum „Ausgangszustand 1996“ (AUS 1996) dargestellt (Abb. 7.18)

Abb. 7.18: Gegenüberstellung der Grundwasserentnahmen – Ausgangszustand 1996 und Prognosevariante 2010 – nach Ländern und Branchen [Mio. m³]



Baden-Württemberg

Der aus einer von der Universität Hannover für die Stadt Mannheim erstellten Bedarfsprognose abgeleitete Wasserbedarf führt für das Jahr 2010 zu einer Reduzierung der Entnahmemengen um 9 % im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung bzw. um 15 % im industriellen Bereich im Vergleich zum Referenzjahr 1996.

Von dieser pauschalen Reduzierung der Wassermengen wurde aufgrund der in Wasserrechtsverfahren geäußerten, qualitätsbedingten Verlagerungsabsichten nur für die Wasserfassungen Käfertal der Stadt Mannheim (-18 %) und Schwetzingen Hardt des Zweckverbandes Kurpfalz (+3 %) abgewichen. Im Wasserwerk Schwetzingen Hardt ist außerdem eine Umverteilung der Entnahmemengen hin zu einer stärkeren Inanspruchnahme des OGWL und damit zu einer Entlastung des MGWL berücksichtigt, die mit dem im Jahre 2000 neu zu erteilenden Wasserrecht umgesetzt werden soll.

Hessen

Entsprechend dem Grundwasserbewirtschaftungsplan für das Hessische Ried wird in Hessen von einer Verminderung der Entnahmen ausgegangen. Gleichzeitig werden im Hessischen Ried schrittweise Infiltrationsmaßnahmen umgesetzt. Für die Modellrechnung wurden Entnahmen für das Jahr 2010 vorgegeben, in denen die Infiltrationen bereits berücksichtigt sind. Insgesamt sollen die Entnahmen netto um ca. 4 Mio. m³/a gegenüber 1996 reduziert werden.

Rheinland-Pfalz

Eine Befragung der Wasserversorgungsunternehmen durch die wasserwirtschaftlichen Genehmigungsbehörden für die Aufstellung des „Wasserversorgungsplans“ im Jahr 1996 ergab, dass mittelfristig im Ballungsraum Ludwigshafen-Frankenthal und Schifferstadt eine Steigerung des Wasserbedarfs von ca. 6 % über den Zeitraum von 15 Jahren erwartet wird. Die Entnahmen der öffentlichen Trinkwasserversorgung sollen von insgesamt 32,8 Mio. m³ (1996) auf 34,9 Mio. m³ (2010) (einschließlich der knapp außerhalb des Modellgebietes gelegenen Wasserwerke Speyer-Süd und Waldsee) ansteigen. Berücksichtigt wurde die Verlagerung der Entnahmen vom WW Speyer-Süd zum WW Speyer-Nord (Steigerung Speyer-Nord von 1,0 auf 2,0 Mio. m³/a) sowie eine deutliche Entnahmeerhöhung im WW Schifferstadt (Steigerung von 0,7 auf 1,4 Mio. m³/a). Die Brauchwasser- und Beregnungsentnahmen wurden gegenüber 1996 um 1,0 Mio. m³ erhöht. Entsprechend der Abb. 7.18 steigen die Gesamtentnahmen, ohne Speyer-Süd und Waldsee, im Modellgebiet von 55 Mio. m³ im Jahr 1996 auf 58 Mio. m³ im Prognosejahr 2010.

Entnahmen zur Grundwasserhaltung/-sanierung

Für die stationäre Überprüfung des Rechenfalls „Oktober 1996“ wurden in Tabelle 7.4 folgende Entnahmen zur Grundwasserhaltung/-sanierung eingerechnet:

Tab.7.4: **Grundwasserhaltungs/-sanierungsentnahmen im Ausgangszustand 1996 (AUS 96) [Mio. m³]**

Betreiber	Grundwasserleiter	AUS 96 Entnahme [Mio. m ³ /a]
Stadtgebiet Ludwigshafen	OGWL	1,05
Stadtgebiet Ludwigshafen	MGWL oben	0,20
Kläranlage St. Leon	OGWL	2,30
Thermal Walldorf	OGWL	0,08
Dr. Freund Sandhausen	OGWL	0,08

Dem stehen jedoch 1998 in Ludwigshafen deutlich höhere Entnahmen für Grundwasser-sanierungsmaßnahmen (rd. 4,9 Mio. m³) gegenüber. Um die Unsicherheiten durch die temporären Grundwasserhaltungen und Sanierungen zu eliminieren, wurden diese sowohl in der Prognosevariante 2010 als auch im Ausgangszustand 1996 nicht eingerechnet.

Im einzelnen wurden für die Prognosevariante 2010 folgende Eingangsdaten verwendet:

- Prognostizierte Jahresentnahmen 2010 (ohne Grundwasserhaltungen/-sanierungen)
- vieljährige mittlere Grundwasserneubildung (Reihe 1960-1997)
- Wasserstand der oberirdischen Hauptgewässer Rhein und Neckar aus langjährigem Mittel der vorhanden Pegel

Durch Differenzbildung zwischen der Prognoserechnung 2010 und dem Ausgangszustand 1996 ergibt sich aufgrund der sonst gleichen Randbedingungen die Auswirkung der veränderten Entnahmesituation. Die Ergebnisse sind in den Karten 18a und b zusammengestellt.

Im OGWL (Karte 18 a) ergeben sich Aufspiegelungen im hessischen Teilgebiet. Diese sind auf eine Reduzierung der Entnahmen im Wasserwerk Bürstadt und Jägersburger Wald zurückzuführen. Aufgrund des in diesem Bereich relativ durchlässig ausgebildeten OZH wirkt sich die Entnahmereduzierung im MGWL auch im OGWL aus. Im baden-württembergischen Teil stellen sich im OGWL südlich des Neckars im Bereich Schwetzinger Hardt Absenkungen von bis zu 40 cm ein. Diese werden durch eine Entnahmeerhöhung von 1,9 auf 4,1 Mio. m³/a im OGWL hervorgerufen, die aus einer Entnahmeverlagerung herrührt und der Schonung der tieferen Grundwässer dient. Die Reichweite der Absenkung ist gering, da sie durch geringere Entnahmen in anderen Wassergewinnungsgebieten der Öffentlichen Wasserversorgung und im Brauchwasserbereich kompensiert wird. So hat der Bereich mit 10 cm Absenkung eine Ausdehnung von lediglich 2 km. Im gesamten übrigen Bereich südlich des Neckars ergeben sich leichte Aufspiegelungen von rd. 10 cm. Nördlich des Neckars ergeben sich ausgehend vom Wasserwerk Käfertal Aufspiegelungen von bis zu 90 cm im OGWL, die durch eine Entnahmereduzierung von 5,8 auf 3,0 Mio. m³/a hervorgerufen werden. Diese Aufspiegelungen schließen an die im hessischen Teil vom Wasserwerk Bürstadt ausgehenden Aufspie-

gelungen an und heben den Grundwasserspiegel bis zur nördlichen Grenze des Grundwassermodells um rd. 50 cm an. Zur Rheinniederung nehmen die Aufspiegelungen im hessischen und baden-württembergischen Teil dann kontinuierlich auf rd. 10 cm ab. Auf der rheinland-pfälzischen Seite führt die Entnahmesteigerung in Speyer-Nord zu einer geringen Absenkung im OGWL von wenigen Dezimetern. Das seit 1992 in Speyer-Nord laufende hydrologisch/ökologische Beweissicherungsprogramm ergab, dass ein Zusammenhang zwischen der Dynamik des oberflächennächsten Grundwasserhaushaltes (Terrassensande des Speyerbachschwemmfächers) mit den daran gebundenen Biotopen und den Grundwasserentnahmen aus dem MGWL und tGWL nicht besteht.

Im MGWL (Karte 18 b) ergeben sich wie im OGWL durch die Entnahmereduzierungen um rd. 4,0 Mio. m³/a Aufspiegelungen im hessischen Teilgebiet. Im baden-württembergischen Untersuchungsraum stellt sich im Stadtgebiet von Mannheim mit bis zu 1,0 m der größte Druckanstieg ein. Dies wird insbesondere durch die Entnahmereduzierung von 15 % für den gesamten Brauchwasserbereich hervorgerufen. Außerhalb des Stadtgebietes von Mannheim stellen sich mit bis zu 80 cm im Wassergewinnungsgebiet des ZV Badische Bergstraße die höchsten Druckanstiege ein. Südlich des Neckars steigt zwischen dem Rhein und dem Wassergewinnungsgebiet Rheinau der Druckspiegel um bis zu 40 cm an, hervorgerufen durch reduzierte Brauchwasserentnahmen. Im Bereich der Wassergewinnung Schwetzinger Hardt stellen sich kleinräumig geringe Druckabsenkungen ein, da hier im oberen und mittleren MGWL eine Entnahmesteigerung von 1,7 auf 2,7 Mio. m³/a angenommen wurde. Deutliche Druckanstiege ergeben sich hier im unteren MGWL, unterhalb des hier maßgebenden Zwischenhorizontes ZH3, aufgrund einer Entnahmereduzierung von 7,0 auf 4,1 Mio. m³/a. In Rheinland-Pfalz ergeben sich zusätzliche Absenkungen zwischen 0,5 m und 2 m im Umfeld der Wassergewinnungen Schifferstadt und Speyer-Nord.

In Tabelle 7.5 sind die Bilanzkomponenten des Ausgangszustands 1996 (unter Ansatz mittlerer Grundwasserneubildung) mit dem Prognosezustand 2010 verglichen. Die reduzierten Entnahmen werden durch den veränderten Austausch mit den oberirdischen Gewässern ausgeglichen. Dabei steigt der Zufluss aus den oberirdischen Gewässern in das Grundwasser in Bereichen mit Absenkungen im OGWL. In Bereichen mit Grundwasseraufspiegelungen erhöht sich der Abfluss von Grundwasser in die oberirdischen Gewässer.

Tab.7.5: **Bilanzkomponenten des Ausgangszustands (AUS 96) und des Prognosezustands 2010 [Mio. m³]**

Bilanzkomponenten	AUS 1996	Prognose 2010
Grundwasserneubildung aus Niederschlag	+ 141	+ 141
Randzufluss	+ 49	+ 49
Zufluss aus Gewässer	+ 109	+ 108
Summe der Zuflüsse	+ 299	+ 298
Randabfluss	- 12	- 12
Entnahme	- 164	- 159
Abfluss in Gewässer	- 123	- 127
Summe der Abflüsse	- 299	- 298

7.2.6 Bewertung und Ausblick

Das großräumige Grundwassermodell für den Rhein-Neckar-Raum wurde auf der Grundlage einer umfassenden Neuinterpretation der Hydrogeologie mehrschichtig aufgebaut und umfasst 5 Grundwasserstockwerke, die durch 4 Zwischenhorizonte bereichsweise hydraulisch getrennt sind. Es sind aktuelle hydrologische und wasserwirtschaftliche Randbedingungen berücksichtigt worden, mit denen das Modell die großräumigen Strömungsverhältnisse in den verschiedenen Grundwasserleitern realistisch reproduziert und sich den gemessenen Grundwasserständen nach Abschluss der Modelleichung zufriedenstellend annähert. Es ist damit in der Lage Veränderungen der Grundwasserverhältnisse aufgrund von vorgegebenen Entnahmebedingungen oder auch veränderten hydrologischen Randbedingungen in ihren großräumigen Auswirkungen zutreffend zu prognostizieren.

Bei der Modelleichung wurde der Spielraum bei den verschiedenen Systemkenngößen und Randbedingungen nicht im Detail ausgeschöpft. Dies soll im Rahmen einer systematischen Fortschreibung auf Grundlage aktueller und dafür geeigneter lokaler und regionaler Untersuchungen außerhalb der HGK erfolgen.

Die auf Grundlage der Modelleichung angestellten Wasserbilanzbetrachtungen zeigten, dass die größte Schwankungsbreite aller Bilanzgrößen bei der Grundwasserneubildung aus Niederschlag festzustellen ist. Diese kann in einem Nassjahr wie z. B. 1983 rd. das 5-fache der Neubildung von einem Trockenjahr erreichen. Der Zufluss aus den oberirdischen Gewässern – maßgebend sind Rhein und Neckar – erreicht im Mittel zwischen 1983 und 1993 rd. 112 Mio. m³/a. Der Abfluss von Grundwasser in die Gewässer war im Betrachtungszeitraum rd. 20 Mio. m³/a höher als die Infiltration aus Gewässern. Die Grundwasserentnahmen änderten sich zwischen 1983 und 1993 nur geringfügig und lagen im Durchschnitt bei rd. 178 Mio. m³/a.

Für die verschiedenen Teilgebiete des Gesamttraums ließen sich ebenfalls Grundwasserbilanzen erstellen, die zur teilgebietspezifischen Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse herangezogen werden konnten.

Der 3. Bericht der Hydrogeologischen Kartierung stellt in Verbindung mit dem aktualisierten großräumigen Grundwassermodell ein wichtiges Instrument zur Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum dar. Er bildet die Arbeitsgrundlage für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen, die den Grundwasserschutz und die Grundwassernutzung im Rhein-Neckar-Raum betreffen. Weiterführende regionale Untersuchungen bzw. Planungen, wie

- Ermittlung von Einzugsgebieten, Abgrenzung von Schutzgebieten,
- Optimierung von Entnahmen unter den Aspekten Umweltverträglichkeit und Grundwasserbeschaffenheit (z.B. Bewirtschaftungspläne i. S. der Wasserrahmenrichtlinie),
- Erfordernis von Maßnahmen zur Sanierung und Stabilisierung von Grundwasserständen in grundwassersensiblen Regionen, z.B. Wald, Naturschutzgebiete, Feuchtbiotope,
- Bewertung und Sanierung von Schadensfällen,
- Konzeption von Baumaßnahmen (Wasserhaltung, Hochwasserschutz, etc.),
- Abschätzung der Wechselwirkung Grundwasser/Oberflächengewässer im Zuge von Renaturierungen (Vernässungsproblemen, etc.),

können auf der umfangreichen Datenbasis der HGK und den Ergebnissen des Großraummodells aufbauen. Notwendige Detailmodelluntersuchungen zur Lösung der v.g. regionalen Aufgaben, können mit dem Großraummodell auf Plausibilität überprüft werden. Das Großraummodell bildet somit die Schnittstelle zur Lösung regionaler Grundwasserbewirtschaftungsfragen.

Auch zukünftig ist eine Fortschreibung der Datenbestände und der darauf gestützten Interpretationen mit einem gegenseitigen Informationsaustausch innerhalb der Arbeitsgruppe erforderlich. Insbesondere sollte das großräumige Grundwassermodell regelmäßig fortgeschrieben und aktualisiert werden, wobei jedoch nicht jede Detailuntersuchung unmittelbar in das Großraummodell einfließen muss. Es ist vorstellbar, dass von der Arbeitsgruppe beispielsweise über einen Zeitraum von zwei Jahren neue Informationen aus Detailuntersuchungen zusammengestellt werden, die erst dann in eine Modellfortschreibung münden. Lokale und regionale Modelluntersuchungen im Rhein-Neckar-Raum sollten grundsätzlich auf der Grundlage des HGK-Modells begonnen werden. Änderungen von Systemparametern und Randbedingungen sollten vom jeweiligen Modellbearbeiter dargestellt und erläutert werden.

Eine solche schrittweise Fortschreibung verbunden mit einer aktualisierten quantitativen Zustandsbeschreibung der Grundwasservorkommen führt zu einer stetigen Verbesserung der Aussagekraft des Großraummodells.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Der vorliegende 3. Bericht behandelt folgende wesentliche Aufgabenpunkte:

1. Fortschreibung der hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Daten für den Zeitraum 1983 bis 1998
2. Differenzierte Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit
3. Fortschreibung des großräumigen Grundwassermodells
4. Bewertung und Folgerungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse des vorliegenden 3. Berichtes zusammengefasst:

Im Kapitel **GEOLOGIE, HYDROGEOLOGIE** wurde aufgezeigt, dass die vorliegende dritte Bearbeitung sich von den beiden vorherigen vor allem in methodischer Hinsicht unterscheidet. Sowohl Basisdaten als auch Auswertergebnisse wurden digital erfasst und liegen in fortschreibungsfähiger Form vor. Sie können in Zukunft elektronisch recherchiert, visualisiert und weiterverarbeitet werden. Inhaltlich ließ sich die Modellvorstellung über die räumliche Verbreitung der Schichten im Oberrheingraben durch die größere Aufschlussdichte, die erst durch die digitale Datenaufbereitung voll ausgeschöpft werden konnte, verbessern und in einigen Bereichen weiter differenzieren.

Es wurde ein dreidimensionales Modell, das die Verbreitung der hydrogeologischen Einheiten im Untergrund zeigt, durch ein Netz von Schnitten und Schichtlagerungskarten erzeugt. Für die wichtigsten Grenzflächen zwischen den Grundwasserleitern und den Geringleitern wurden Schichtlagerungskarten erstellt (Obergrenze und Basis des Oberen Zwischenhorizontes OZH, Obergrenzen der Zwischenhorizonte ZH2, ZH3 und des Unteren Zwischenhorizontes UZH). Die Schnitte und Schichtlagerungskarten liegen als digitale Datensätze vor und können bei Bedarf aktualisiert und weiterverarbeitet werden.

Für die verschiedenen Grundwasserleiter im Rhein-Neckar-Raum wurden erstmals Durchlässigkeitsverteilungen in Form von Isolinienplänen erarbeitet. Die Beurteilung der Durchlässigkeit des Oberen Zwischenhorizontes OZH ist anhand der auskartierten Faziesbereiche möglich. Ziel weiterer Untersuchungen zu den Durchlässigkeiten der Grundwasserleiter in der linksrheinischen Grabenhälfte war die Überprüfung und ggf. Ergänzung der vorliegenden Durchlässigkeitswerte (T/H) aus dem Bericht von 1987 entsprechend dem weiter differenzierten hydrogeologischen Stockwerksbau.

Im Kapitel **HYDROLOGIE** wurde die Entwicklung der Grundwasserstände über den Zeitraum von 1970 bis 1998 punktuell anhand von Grundwasserstandsganglinien sowie flächenhaft für durchschnittlich mittlere hydrologische Verhältnisse und für trockene Jahre mittels Grundwasserhöhengleichenplänen beschrieben. In Fortschreibung des 2. Berichtes (Stand 1983) ist festzuhalten, dass die Grundwasserstände im Untersuchungsraum in unterschiedlichem Maße von den Einflussgrößen Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag, In- und Exfiltration der oberirdischen Gewässer und Grundwasserentnahmen geprägt werden. Dementsprechend zeigen die über den Untersuchungsraum verteilten, ausgewählten

Grundwasserstandsmessstellen ein differenziertes Schwankungsverhalten des Grundwassers über den fortgeschriebenen Zeitraum von 1984 bis 1998. Zur differenzierten Beschreibung der Grundwasserstandsentwicklung wurde das Untersuchungsgebiet, wie bereits im Bericht der 2. Stufe, in 13 Teilgebiete unterteilt. Die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände kann zusammenfassend folgendermaßen charakterisiert werden:

Überdurchschnittliche Niederschläge in den Jahren 1982 und 1983 führten zu hohen Grundwasserständen in den Teilgebieten, die auch noch im Normaljahr 1984 über ihren vieljährigen Mittelwerten lagen. Unterdurchschnittliche Niederschläge in den Jahren 1985 bis 1987 verursachten ein Absinken der Grundwasserstände unter die vieljährigen Mittelwerte. Im Bereich der Rheinniederung stützte der Rhein die Grundwasserstände. Darauf folgende überdurchschnittlich trockene Jahre führten zu einem weiteren Absinken der Grundwasserstände bis in das Jahr 1993. In den zwei Nassjahren 1994 und 1995 erholten sich die Grundwasserstände wieder und stiegen über die vieljährigen Mittelwerte an. Im Trockenjahr 1996 fielen die Grundwasserstände wieder unter ihre Mittelwerte, sie erholten sich jedoch in den Nassjahren 1997 und 1998 und lagen am Ende der Beobachtungszeit meist wieder über den vieljährigen Mittelwerten.

Zur räumlichen Auswertung wurden Höhengleichenkarten für mittlere (Oktober 1990) und niedrige (Oktober 1993) Grundwasserverhältnisse im OGWL und MGWL erstellt und mittels Differenzkarten der Potenzialunterschied zwischen dem OGWL und dem MGWL aufgezeigt. Der Druckunterschied zwischen dem Druckwasserspiegel im Mittleren bzw. Tieferen Grundwasser und der freien Grundwasseroberfläche des Oberen Grundwassers ist im Stadtbereich Ludwigshafen-Mannheim und in den Trinkwassergewinnungsgebieten der Brunnen Hemsbach, Neustadt und Speyerer Stadtwald besonders groß. Die Entnahmen aus der Tiefe verursachten im Stadtgebiet von Ludwigshafen über die zurückliegenden Jahrzehnte eine deutliche Absenkung der freien Oberfläche des Oberen Grundwassers (Frankenthaler Depression). Heute zeigen die Differenzganglinien (Vergleich der Grundwasserstandsganglinien zwischen OGWL und MGWL) im Stadtgebiet von Ludwigshafen/Mannheim einen positiven Trend. Der Druckwasserspiegel im MGWL lag von 1983 bis 1993 rd. 6,5 m tiefer als der freie Wasserspiegel im OGWL. Durch die großräumige Entnahmereduzierung seit 1993 stieg der Druckwasserspiegel wieder an und die Druckdifferenz ging demzufolge bis Ende 1998 auf rd. 5,5 m zurück. In den übrigen Trinkwassergewinnungsgebieten sind weit weniger deutliche lokale Absenkungen der Grundwasseroberfläche festzustellen. Die tiefen Grundwasserentnahmen wirken sich hier großflächig mit geringen Absenkungsbeträgen auf das Obere Grundwasser aus. Rechtsrheinisch, in den Gewinnungsgebieten von Käfertal und Schwetzingen Hardt, sind die Differenzbeträge trotz relativ großer Entnahmen aus der Tiefe gering, da die Entnahmen aus mehreren Stockwerken erfolgen und höhere Mächtigkeiten bzw. Ergiebigkeiten als im linksrheinischen Teilgebiet vorhanden sind.

In der Niederterrasse der hessischen Rheinebene beträgt der Druckunterschied zwischen dem Oberen und Mittleren Grundwasser seit Beginn der Beobachtung im Jahr 1978 ca. 2 m. Kleinere Abweichungen der Differenzen in den Ganglinien weisen auf Schwankungen der Entnahmen aus den Tiefbrunnen Bürstadt, Hemsbach und Käfertal hin; der langfristige Verlauf der Wasserstände ist fast parallel. In der hessischen Rheinebene ist wegen des fehlenden Oberen Zwischenhorizontes (OZH) keine Druckdifferenz zwischen dem OGWL und MGWL vorhanden. Im nordwestlichen Randbereich des Untersuchungsraumes gibt es aber auf hessischer Seite im 3. Grundwasserstockwerk eine Druckdifferenz zwischen dem OGWL und dem UGWL, die zum Absenkungstrichter der Tiefbrunnen nördlich von Worms auf linksrheinischer Seite zunimmt.

Zur Ermittlung der **Grundwasserneubildung** aus Niederschlag wurde ein detailliertes Berechnungsverfahren angewandt, welches u.a. boden- und vegetationspezifische Bedingungen berücksichtigt. Es wurden hiermit die Grundwasserneubildungsverteilungen für die einzelnen Jahre von 1983 bis 1993 sowie die vieljährige mittlere Grundwasserneubildung (Reihe 1961 bis 1993) berechnet. Für den Untersuchungsraum wurde eine mittlere Grundwasserneubildungsrate von 106 mm oder 3,4 l/s x km³ ermittelt.

Im **rheinland-pfälzischen Teil** des Untersuchungsraums, dem im Hinblick auf die Grundwasserbilanzierung auch der knapp außerhalb gelegene Raum Speyer-Süd und Waldsee zugeordnet werden muss, stiegen die **Grundwasserentnahmen** seit 1983 von rd. 60 Mio. m³ bis zum Jahr 1990 mit rd. 64 Mio. m³ um rd. 6,5 % an, danach fielen sie bis 1993 wiederum auf rd. 60 Mio. m³. Die Grundwasserentnahmen für die öffentliche Trinkwasserversorgung und die Brauchwasserversorgung liegen seit 1993 bis zum aktuellen Jahr 1998 auf einem gleichbleibenden Niveau von rd. 60 Mio. m³/a. Unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung im Ballungsraum Ludwigshafen-Frankenthal-Speyer wurde für das Jahr 2010 ein Anstieg der Gesamtentnahmen gegenüber 1996 von rd. 59 Mio. m³/a auf rd. 62 Mio. m³/a prognostiziert und in der Prognosevariante 2010 berücksichtigt.

Im **baden-württembergischen Teil** des Untersuchungsraums kann für die Zeitspanne 1992 bis 1998 eine deutlich rückläufige Entwicklung der Grundwasserentnahmen festgestellt werden. Zwischen 1983 und 1991 war kein eindeutiger Trend erkennbar. Lagen die Entnahmen 1983 noch bei rd. 99 Mio. m³ bzw. im Jahr 1985 bei max. rd. 102 Mio. m³, so fielen die Entnahmen bis 1998 auf rd. 82 Mio. m³. Die Gesamtentnahmen verteilen sich derzeit zu rd. 51 % auf den Oberen Grundwasserleiter bzw. 49 % auf die tieferen Grundwasserleiter unterhalb des Oberen Zwischenhorizonts. 1983 betrug der Anteil aller Grundwasserentnahmen aus dem OGWL noch rd. 63 % bzw. aus den tGWL unterhalb des OZH rd. 37 %. Seit 1992 ist die rückläufige Entwicklung der Entnahmen auch in den tGWL zu beobachten. Für das Jahr 2010 wurde eine Gesamtentnahmemenge von rd. 76 Mio. m³/a prognostiziert. Dies bedeutet im Vergleich zu den Entnahmemengen im Jahr 1996 für das Jahr 2010 eine Abnahme der Entnahmemengen um 7 % im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung bzw. um 15 % im industriellen Bereich.

Im **hessischen Teilgebiet** lagen die Gesamtentnahmen 1983 bei rd. 25 Mio. m³, 1989 stiegen die Entnahmen auf rd. 28 Mio. m³, danach fielen sie wieder kontinuierlich auf rd. 26 Mio. m³ im Jahr 1993 bzw. 23,3 Mio. m³ im Jahr 1996. Das Ziel der Grundwasserbewirtschaftung ist eine bereichsweise Anhebung der Grundwasserstände auf ihr natürliches Niveau insbesondere dort, wo vorher durch Übernutzung mehr als die natürliche Grundwasserneubildung dem Untergrund entnommen wurde. Dieses soll durch eine Verringerung der Entnahmen, Optimierung des Leitungsverbundes, dynamische Steuerung der Grundwasserentnahmen in Verbindung mit einer gleichzeitigen Versickerung von aufbereitetem Rheinwasser sowie durch intensivierte Anwendung wassersparender Beregnungstechniken und verbesserte Beregnungssteuerung in der Landwirtschaft erreicht werden. Für die Prognose 2010 wird von einem Gesamtbedarf von 19,3 Mio. m³ ausgegangen.

Im Kapitel **GRUNDWASSERBESCHAFFENHEIT** wurden durch umfangreiche Untersuchungen die Kenntnisse über die hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer vertieft. Erstmals wurden die Analysedaten umfassend statistisch ausgewertet. Die Verteilung einzelner Inhaltsstoffe wurde aquiferbezogen in Form von Isolinien in Karten dargestellt.

Im **Oberen Grundwasserleiter (OGWL)** sind je nach Oberflächennutzung unterschiedliche Entwicklungen der Grundwasserbeschaffenheit zu erkennen. So sind in Waldgebieten die

Gesamtkonzentrationen anthropogen eingetragener Substanzen nach wie vor sehr gering. Ein ansteigender Trend, der auf einen zunehmenden Schadstoffeintrag aus der Luft hinweist, ist bisher nicht erkennbar. Demgegenüber stehen die großen landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebiete, die in der Vergangenheit oder z.T. auch bis heute anhaltend gebietsweise einen deutlichen Konzentrationsanstieg bei den typischen Agrarchemikalien (Nitrat, PBSM, Chlorid) aufweisen.

Eine langfristig positive Entwicklung lässt die Beschaffenheit der oberirdischen Gewässer erkennen, die in den Infiltrationswasser beeinflussten Bereichen auch zu einer Verbesserung der Grundwasserqualität beitragen.

Im **Mittleren Grundwasserleiter** (MGWL) ist als Folge der bereichsweise intensiven Beanspruchung durch die Grundwasserentnahmen lokal eine Tendenz zur Zunahme der Gesamtmineralisation erkennbar, ein Hinweis einerseits auf steigende anthropogene Einflüsse aus dem OGWL und andererseits auf aufsteigende höherkonzentrierte natrium- und chloridreiche Tiefengrundwässer.

Im **Unteren Grundwasserleiter** (UGWL) sind, wie auch die Isotopenmessungen erwarten lassen, bisher keine gravierenden anthropogenen Einflüsse nachweisbar. Die Grundwasserbeschaffenheit ist daher nach wie vor gut. Aufgrund der Potenzialdifferenzen zwischen dem oberflächennahen und dem tieferen Grundwasser kann jedoch bereichsweise oberflächennahes, durch Altlasten (Kriegsschäden und der jahrzehntelange Umgang mit wassergefährdenden Stoffen in Industriebetrieben) verunreinigtes Grundwasser, vor allem im Stadtgebiet Ludwigshafen/Mannheim, den tieferen Stockwerken zusickern und langfristig zu negativen Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit in den tieferen Grundwasserleitern führen. Bereichsweise müssen schon heute „Reparaturmaßnahmen“ durch die Einrichtung von Abwehrbrunnen im Mittleren Grundwasserstockwerk und den Einsatz von Aufbereitungstechnologien (z. B. im Wasserwerk Parkinsel) durchgeführt werden.

Eine regelmäßige quantitative und qualitative Grundwasserbeobachtung mit entsprechender Bewertung ist daher auch zukünftig erforderlich.

Der Anteil der Gesteinsschichten oberhalb der Grundwasseroberfläche, die sog. „**GRUNDWASSERÜBERDECKUNG**“ wurde hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Bodenwasserhaushalt, die Grundwasserneubildung aus Niederschlag und der Schutzfunktion gegenüber vertikalen Schadstoffverlagerungen erstmals untersucht. Die **Bodenkarte** bildet mit ihren Angaben über Bodenart, Bodenartenschichtung und Schichtmächtigkeiten die Datenbasis für die flächenbezogene Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes. Sie lieferte außerdem wichtige Hinweise zu den Grundwasserflurabständen.

Die Ermittlung der **Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung** beschreibt in vereinfachter und integrierter Form die Gefährdung des Grundwassers durch Schadstoffverlagerungen von der Erdoberfläche durch den Boden und den tieferen Bereich der Grundwasserüberdeckung bis ins Grundwasser. Die Schutzfunktion ermöglicht daher sowohl Aussagen über das Gefährdungspotenzial hinsichtlich flächenhafter Einträge aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung (Düngung, Pflanzenschutz) als auch für die Beurteilung von Deponiealtstandorten, Altlasten u. a. m. auf das Grundwasser. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten im Bereich des Rheintalgrabens gering bis sehr gering ist. Dies ist ganz überwiegend durch die gut bis sehr gut durchlässigen Sedimente des Oberrheingrabens begründet. Dem vorsorgenden flächendeckenden Grundwasserschutz kommt dementsprechend eine hohe Bedeutung zu.

Höhere Werte der Schutzfunktion treten nur im Osten am Übergang zum Odenwald und linksrheinisch westlich der Frankenthaler Terrasse, im Bereich der Lössriedelflächen mit großen Grundwasserflurabständen, auf. Die Karte der Schutzfunktion gibt Hinweise für zukünftige Planungen (z. B. Ausweisung von Bau- und Gewerbegebieten, Verkehrswegebau, Abbau von Steinen und Erden), welche mit den Belangen des vorbeugenden Grundwasserschutzes abzustimmen sind.

Im Kapitel **MATHEMATISCHES GRUNDWASSERMODELL** wird die Fortschreibung des 1985 erstmals länderübergreifend erstellten Grundwassermodells beschrieben. Das vorliegende großräumige Grundwassermodell ist ein dem neuesten Stand der Erkenntnisse angepasstes und von den beteiligten Institutionen der drei Länder anerkanntes Instrument, mit dem Fragen zur künftigen großräumigen Grundwasserbewirtschaftung im Untersuchungsraum behandelt werden können. Das Modell wurde anhand folgender Vergleichszustände angepasst:

- Oktober 1990 - mittlere Grundwasserverhältnisse (Stationäre Bezugsvariante **SBV 1990**)
- Oktober 1996 - aktuelle Nutzungssituation (Modellverifikation **VER 1996**)
- Zeitraum 1983 bis 1993 - Instationäre Reproduktion der mittleren Jahresschwankungen des Grundwassers

Die auf Grundlage der Modelleichung angestellten Wasserbilanzbetrachtungen zeigten, dass die größte Schwankungsbreite aller Bilanzgrößen bei der Grundwasserneubildung aus Niederschlag festzustellen ist. Diese kann in einem Nassjahr wie z. B. 1983 rd. das 5-fache der Neubildung eines Trockenjahres erreichen. Der Zufluss aus den oberirdischen Gewässern – maßgebend sind Rhein und Neckar – erreicht im Mittel zwischen 1983 und 1993 rd. 112 Mio. m³/a. Der Abfluss von Grundwasser in die Gewässer war im Betrachtungszeitraum rd. 20 Mio. m³/a höher als die Infiltration aus Gewässern.

Für die verschiedenen Teilgebiete des Gesamttraums wurden ebenfalls Grundwasserbilanzen erstellen, die zur teilgebietsspezifischen Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse herangezogen werden konnten.

Nach Abschluss der Modelleichung wurde mit dem Modell die Auswirkung der prognostizierten Entnahmesituation 2010 berechnet. Durch Gegenüberstellung der Prognoserechnung 2010 und dem Ausgangszustandes 1996, der auf der Modellverifikation VER 1996 basiert, wurden aufgrund der sonst gleichen Randbedingungen die Auswirkungen erkennbar.

Im OGWL ergeben sich Aufspiegelungen im hessischen Teilgebiet. Diese sind auf eine Reduzierung der Entnahmen in den Wasserwerken Bürstadt und Jägersburger Wald zurückzuführen. Aufgrund des in diesem Bereich relativ durchlässig ausgebildeten OZH wirkt sich die Entnahmereduzierung im MGWL auch im OGWL aus. Im baden-württembergischen Teil stellen sich im OGWL südlich des Neckars im Bereich Schwetzingen Hardt Absenkungen von bis zu 40 cm ein. Diese werden durch Entnahmeverlagerungen hervorgerufen, bei denen zur Schonung der tiefen Grundwässer der Obere Grundwasserleiter stärker beansprucht wird (Entnahmeerhöhung von 1,9 auf 4,1 Mio. m³/a im OGWL). Im gesamten übrigen Bereich südlich des Neckars ergeben sich leichte Aufspiegelungen von rd. 10 cm. Nördlich des Neckars ergeben sich ausgehend vom Wasserwerk Käfertal Aufspiegelungen von bis zu 90 cm im OGWL, die durch eine Entnahmereduzierung von 5,8 auf 3,0 Mio. m³/a hervorgerufen werden. Diese Aufspiegelungen schließen an die im hessischen Teil vom Wasserwerk Bürstadt ausgehenden Aufspiegelungen an und heben den Grundwasserspiegel bis zur nördlichen Grenze des Grundwassermodells um rd. 50 cm an. Auf der rheinland-pfälzischen Seite führt

die Entnahmesteigerung im WW Speyer-Nord zu einer geringen Absenkung im OGWL von unter 20 cm. Das seit 1992 in Speyer-Nord laufende hydrologisch /ökologische Beweissicherungsprogramm ergab, dass ein Zusammenhang zwischen der Dynamik des oberflächennächsten Grundwasserhaushaltes (Terrassensande des Speyerbach-Schwemmfächers) mit den daran gebundenen Biotopen und den Grundwasserentnahmen aus dem MGWL und tGWL nicht besteht.

Im MGWL ergeben sich wie im OGWL durch die Entnahmereduzierungen um rd. 4,0 Mio. m³/a Aufspiegelungen im hessischen Teilgebiet. Im baden-württembergischen Teil stellen sich im Stadtgebiet von Mannheim mit bis zu 1,0 m die größten Druckanstiege ein. Dies wird insbesondere durch die Entnahmereduzierung von 15 % für den gesamten Brauchwasserbereich hervorgerufen. Außerhalb des Stadtgebietes von Mannheim stellen sich mit bis zu 80 cm im Wassergewinnungsgebiet des ZV Badische Bergstraße die höchsten Druckanstiege ein. Südlich des Neckars steigt zwischen dem Rhein und dem Wassergewinnungsgebiet Rheinau der Druckspiegel um bis zu 40 cm an, hervorgerufen durch reduzierte Brauchwasserentnahmen. Im Bereich der Wassergewinnung Schwetzingen Hardt stellen sich kleinräumig geringe Druckabsenkungen ein, da hier im oberen und mittleren GWL eine Entnahmesteigerung von 1,7 auf 2,7 Mio. m³/a angenommen wurde. Deutliche Druckanstiege ergeben sich hier im unteren GWL, unterhalb des hier maßgebenden Zwischenhorizontes ZH3, aufgrund einer Entnahmereduzierung von 7,0 auf 4,1 Mio. m³/a. In Rheinland-Pfalz ergeben sich zusätzliche Druckabsenkungen zwischen 0,5 m im Umfeld der Brunnen Schifferstadt (Erhöhung auf 1,4 Mio. m³/a) und rd. 2,0 m im Nahbereich der Brunnen vom Wasserwerk Speyer-Nord (Erhöhung auf 2,0 Mio. m³/a).

Folgerungen

Der 3. Bericht der Hydrogeologischen Kartierung stellt in Verbindung mit dem aktualisierten großräumigen Grundwassermodell ein wichtiges Instrument zur Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum dar. Er bildet die Arbeitsgrundlage für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen, die den Grundwasserschutz und die Grundwassernutzung im Rhein-Neckar-Raum betreffen. Weiterführende regionale Untersuchungen bzw. Planungen, wie

- Ermittlung von Einzugsgebieten, Abgrenzung von Schutzgebieten,
- Optimierung von Entnahmen unter den Aspekten Umweltverträglichkeit und Grundwasserbeschaffenheit (z.B. Bewirtschaftungspläne i. S. der Wasserrahmenrichtlinie),
- Erfordernis von Maßnahmen zur Sanierung und Stabilisierung von Grundwasserständen in grundwassersensiblen Regionen, z. B. Wald, Naturschutzgebiete, Feuchtbiotope,
- Bewertung und Sanierung von Schadensfällen,
- Konzeption von Baumaßnahmen (Wasserhaltung, Hochwasserschutz, etc.),
- Abschätzung der Wechselwirkung Grundwasser/Oberflächengewässer im Zuge von Renaturierungen (Vernässungsprobleme, etc.),

können auf der umfangreichen Datenbasis der HGK und den Ergebnissen des Großraummodells aufbauen. Notwendige Detailmodelluntersuchungen zur Lösung der v. g. regionalen Aufgaben, können mit dem Großraummodell auf Plausibilität überprüft werden. Das Großraummodell bildet somit die Schnittstelle zur Lösung regionaler Grundwasserbewirtschaftungsfragen.

Als Beispiel für eine weiterführende regionale Planung auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse der HGK sei der Grundwasserbewirtschaftungsplan „Hessisches Ried“ genannt. Dieser legt die erforderlichen Maßnahmen auf der Grundlage des § 36b WHG fest,

um eine nachhaltige umweltverträgliche Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen im Hessischen Ried zu sichern. Gleichzeitig koordiniert er als wesentlicher Baustein für die Entwicklungsfähigkeit des Landschafts- und Wirtschaftsraumes Rhein-Main die vielfältigen Nutzungsansprüche an das Grundwasser. In Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg werden, wie z.B. im Raum Speyer, vor Erteilung einer wasserrechtlichen Zulassung zur Grundwasserentnahme, umfangreiche Untersuchungen als Voraussetzung für einen späteren, ökologisch vertretbaren Entnahmebetrieb durchgeführt.

Auch zukünftig ist eine Fortschreibung der Datenbestände und der darauf gestützten Interpretationen mit einem gegenseitigen Informationsaustausch innerhalb der Arbeitsgruppe erforderlich. Insbesondere sollte das großräumige Grundwassermodell regelmäßig fortgeschrieben und aktualisiert werden, wobei jedoch nicht jede Detailuntersuchung unmittelbar in das Großraummodell einfließen muss. Es ist vorstellbar, dass von der Arbeitsgruppe beispielsweise über einen Zeitraum von zwei Jahren neue Informationen aus Detailuntersuchungen zusammengestellt werden, die erst dann in eine Modellfortschreibung münden. Lokale und regionale Modelluntersuchungen im Rhein-Neckar-Raum sollten grundsätzlich auf der Grundlage des HGK-Modells begonnen werden. Änderungen von Systemparametern und Randbedingungen sollten vom jeweiligen Modellbearbeiter dargestellt und erläutert werden.

Eine solche schrittweise Fortschreibung, verbunden mit einer aktualisierten quantitativen Zustandsbeschreibung der Grundwasservorkommen, führt zu einer stetigen Verbesserung der Aussagekraft des Großraummodells.

9 LITERATUR

- [1] REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried. Darmstadt.
- [2] AG FIS HYDROGEOLOGIE (1994): Datenfeldkatalog für Punktdaten. Ergebnisbericht der FIS Arbeitsgruppe Hydrogeologie der Ad-hoc-AG Hydrogeologie der Geologischen Landesämter: 11 S., 7 Anl. Wiesbaden [unveröff.].
- [3] PREUSS, H., VINKEN, R. & VOSS, H. (1991): Symbolschlüssel Geologie. 3. Aufl.: 328 S., 1 Abb., 21 Tab.; Hannover (Nieders. L.-Amt f. Bodenforschung und Bundesanstalt f. Geo-Wissenschaften u. Rohstoffe).
- [4] WESSOLEK, G. (1992): Untersuchungen zum Wasserhaushalt im UVF des Umlandverbandes Frankfurt. Unveröff. Studie im Auftrag des UVF, 40 S., 16 Abb., 13 Tab.; Berlin.
- [5] HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. DWD, 2, 124 S., 11 Abb., 4 Tab.; Bad Kissingen.
- [6] SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung, Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, Tokio.
- [7] DOMMERMUTH, H. & TRAMPF, W. (1990): Die Verdunstung in der Bundesrepublik Deutschland, Zeitraum 1951-1980 Teil 1, Selbstverlag des DWD, Offenbach/Main.
- [8] AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Aufl., 331 S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil.; Hannover.
- [9] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1997): Ergebnisse täglicher Niederschlagsanalysen in Deutschland von 1982 bis 1995. UBA Texte 10-97; 452 S., div. Abb. u. Tab.; Berlin.
- [10] HORLACHER, D., GAMER, W., ZEDDIES, J., RÖMHELD, V. UND JUNGBLUTH, T. (1997): Bilanzen von potentiell umweltbelastenden Nährstoffen (N, P, S) sowie Ammoniak aus der Landwirtschaft in Baden-Württemberg. Universität Hohenstein (Forschungsauftrag des Ministeriums für ländlichen Raum Baden-Württemberg).
- [11] DEUTSCHE KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DES RHEINS (1996): Zahlentafeln der physikalisch-chemischen Untersuchungen 1994.
- [12] DREHER, T. (1993): Die chemische Beschaffenheit der tieferen Grundwasservorkommen im nördlichen Oberrheingraben. 138 S., 59 Abb., 14 Tab., 1 Anhang; Diss. Universität (TH) Karlsruhe.
- [13] BOYSEN, P. (1992): Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln. UBA-Texte 55/92; Berlin.
- [14] GÖPPEL, M. & EICHINGER, L. (1996): Isotopenhydrologische und hydrochemische Untersuchungen im Bereich des Oberrheingrabens. Unveröffentlichter Bericht; 60 S., 44 Abb., 9 Tab., 7 Anlagen; Schweitenkirchen.
- [15] RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1998): Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz. Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen; 207 S.; Stuttgart.
- [16] HÖLTING, B., HABERTLE, TH., 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, S. 5-24; Hannover.
- [17] LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT RHEINLAND-PFALZ (1994): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Rheinhessen – Erstellung und Einsatz eines großräumigen Grundwassermodells in der Rheinebene zwischen Worms und Oppenheim. Mainz.