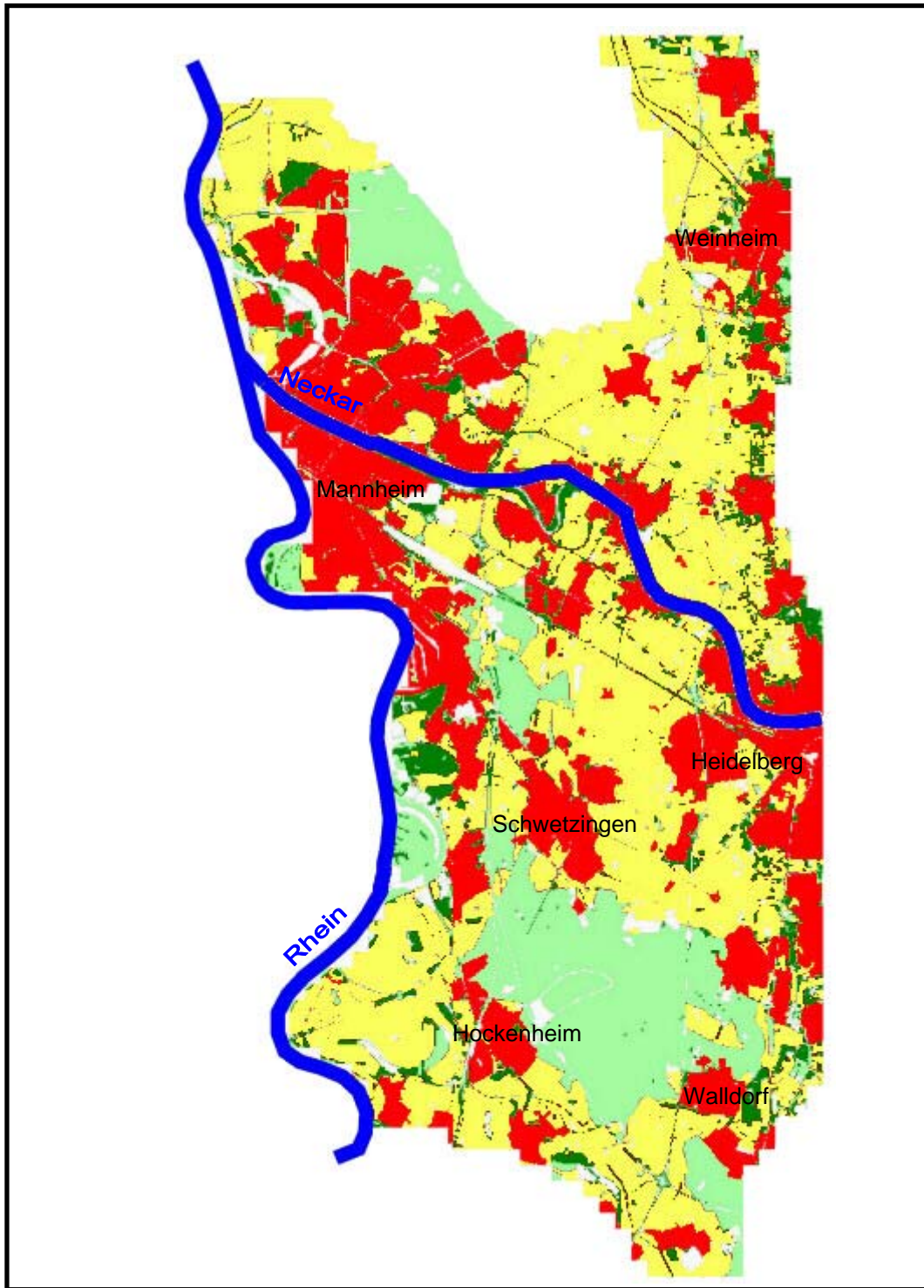


# Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit in Mannheim, Heidelberg und im Rhein-Neckar-Kreis



März 2003

**Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung  
im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit  
in Mannheim, Heidelberg und im Rhein-Neckar-Kreis**

Regierungspräsidium Karlsruhe

März 2003

## **Impressum**

Herausgeber	Regierungspräsidium Karlsruhe Abteilung Umweltschutz und Wasserwirtschaft
Bearbeitung	Universität Stuttgart Institut für Wasserbau  Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg
Finanzierung	Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg

## Vorwort des Herausgebers

In der vorliegenden Studie wurden am Beispiel des Rhein-Neckar-Raumes modellhaft Kriterien erarbeitet, mit deren Hilfe beurteilt werden kann, ob Grundwasser nachhaltig bewirtschaftet wird. Diese Kriterien bilden zusammen genommen einen Beurteilungsrahmen und orientieren sich an zentralen Aspekten einer Strategie für eine nachhaltige Bewirtschaftung: Ökologie, Ökonomie und gesellschaftliche Akzeptanz.

Anlass für die Studie sind die im Rhein-Neckar-Raum nach wie vor hohen, teilweise konkurrierenden Ansprüche auf Entnahme von Grundwasser, die auf die dichte Besiedelung und wasserintensive Industrie zurückzuführen sind, sowie entnahmebedingte Veränderungen in den Grundwasserkörpern. Konkret ist die Grundwassersituation gekennzeichnet durch:

- große Entnahmemengen
- Belastungen im oberen Grundwasserleiter
- gestiegenes Risiko der Schadstoffverschleppung aus dem oberen in den mittleren Grundwasserleiter

Es war daher fraglich, ob die Ressource Grundwasser im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung als langfristig gesichert angesehen werden kann.

Die Studie wurde im Auftrag des Regierungspräsidiums Karlsruhe durch die Universität Stuttgart durchgeführt, wobei die Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg im Auftrag der Universität Stuttgart schwerpunktmäßig den Themenkreis gesellschaftliche Akzeptanz bearbeitet hat.

Ein Projektbeirat unter Federführung des Regierungspräsidiums Karlsruhe hat die Arbeiten begleitet, vertreten waren:

- Regierungspräsidium Karlsruhe
- Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart
- Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- Gewässerdirektion Nördlicher Oberrhein, Bereich Heidelberg

Die Studie wird den Nutzern und Wasserbehörden an die Hand gegeben und soll sie bei der Beurteilung der zukünftigen Grundwasserbewirtschaftung und der Einbeziehung der Grundsätze einer nachhaltigen Entwicklung unterstützen.

Karlsruhe, im März 2003

Reinhold Feiler  
Abteilungsleiter

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Anlass .....	3
1.2	Betrachtungsraum .....	3
1.3	Zielsetzung .....	4
1.4	Arbeitsprogramm und Vorgehensweise .....	5
1.5	Abschlussberichte.....	7
<b>2.</b>	<b>Numerisches Grundwassermodell .....</b>	<b>8</b>
2.1	Anpassung des Modells .....	8
2.2	Erweiterung des Modells .....	9
2.3	Auswertungsmöglichkeiten.....	9
<b>3.</b>	<b>Ausgangslage .....</b>	<b>11</b>
<b>4.</b>	<b>Nachhaltigkeit in der Grundwasserbewirtschaftung .....</b>	<b>14</b>
4.1	Definitionen.....	14
4.2	Bewertungskriterien.....	16
<b>5.</b>	<b>Gesellschaftliche Akzeptanz nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung.....</b>	<b>18</b>
5.1	Konzept und Methodik.....	18
5.2	Ergebnisse aus Umfrage und Workshop.....	19
5.3	Strategische Ansätze zur Verbesserung der Grundwassersituation.....	21
5.4	Interessens- und Zielkonflikte.....	22
5.5	Schlussfolgerungen .....	23
<b>6.</b>	<b>Szenariobetrachtungen.....</b>	<b>24</b>
6.1	Vorgehensweise .....	24
6.2	Referenzzustände .....	24
6.3	Hydrologische Randbedingungen .....	24
6.4	Prognoseszenarien Entnahmeverlagerung .....	25
6.5	Prognoseszenarien Entnahmereduktion .....	25
<b>7.</b>	<b>Ergebnisse der Modell-Szenariorechnungen .....</b>	<b>26</b>
7.1	Vergleich der Referenzzustände .....	26
7.2	Prognoseszenarien Entnahmeverlagerung .....	32
7.3	Prognoseszenarien Entnahmereduktion .....	32
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerungen zu Grundsätzen der Bewertung nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung.....</b>	<b>34</b>
8.1	Schlussfolgerungen aus den stationären Modellbetrachtungen .....	34
8.2	Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Erarbeitung von Handlungsoptionen .....	36
8.3	Schlussfolgerungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz.....	37
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>38</b>
9.1	Zusammenfassung .....	38
9.2	Ausblick .....	39
	<b>Literatur .....</b>	<b>40</b>

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1.1:	Modellgebiet Rhein-Neckar-Raum (3.HGK, 1999), Betrachtungsraum Baden-Württemberg (grün unterlegt).....	4
Abbildung 3.1:	Entnahmemengen 1996 im Modellgebiet [mio m <sup>3</sup> /a] .....	12
Abbildung 4.1:	Nachhaltigkeitsdreieck .....	14
Abbildung 4.2:	Bewertungsbandbreiten Flurabstand .....	17
Abbildung 5.1:	Bezug von Inhalten des Fragebogens zu den drei Zieldimension der Nachhaltigkeit (ökonomische, ökologische und soziale Zieldimension) .....	18
Abbildung 7.1:	Vertikale Austauschraten, Null-Entnahme, Normaljahr .....	27
Abbildung 7.2:	Vertikale Austauschraten, Referenzzustand 1996, Normaljahr .....	27
Abbildung 7.3:	Hydrologische Schwankungsbreite .....	29
Abbildung 7.4:	Verhältnis entnahmebedingte Absenkungen zu hydrologischer Schwankungsbreite, Referenzzustand 1996, Normaljahr .....	29
Abbildung 7.5:	Entnahmebedingte Absenkungen, Referenzzustand 1996, Normaljahr.....	29
Abbildung 7.6:	Landnutzungen im Teilgebiet Baden-Württemberg .....	30
Abbildung 7.7:	Bewertung Ackerland, Referenzzustand 1996, Normaljahr .....	31
Abbildung 7.8:	Empfindlichkeiten der Bewertung Ackerland, Referenzzustand 1996 .....	31
Abbildung 7.9:	Verhältnis entnahmebedingter Absenkungen zu hydrologischen Schwankungen, Referenzzustand 1996, Normaljahr .....	31
Abbildung 8.1:	Zusammenhang Entnahmerate MGWL und Austauschvolumen OGWL-MGWL .....	35
Tabelle 3.2:	Wasserbilanz OGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m <sup>3</sup> /a].....	13
Tabelle 3.3:	Wasserbilanz MGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m <sup>3</sup> /a] .....	13
Tabelle 3.4:	Wasserbilanz UGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m <sup>3</sup> /a].....	13
Tabelle 5.1:	Rücklaufquoten (in %) für einzelne Zielgruppen der Erhebung .....	19
Tabelle 5.2:	Verlagerungsmöglichkeiten vom mittleren zum oberen Grundwasserleiter .....	21
Tabelle 6.1:	Hydrologische Randbedingungen .....	24
Tabelle 6.2:	Stufen der Verlagerungsszenarien.....	25
Tabelle 6.3:	Stufen der Reduktionsszenarien .....	25

# 1. Einleitung

## 1.1 Anlass

Aufgrund der intensiven Nutzung des Grundwassers im Rhein-Neckar-Raum sowie der gebietsweise hohen Schadstoffbelastung des oberen Grundwasserleiters stellt sich die Frage der langfristigen Sicherung der Versorgung mit ortsnahem Grundwasser unter quantitativen und qualitativen Gesichtspunkten. Hierbei spielt eine besondere Rolle, dass das Risiko einer Schadstoffverschleppung in bislang unbelastete tiefere Grundwasserleiter durch verstärkte Entnahmen aus dem mittleren Grundwasserleiter und der damit verbundenen Umkehr der ursprünglichen Druckverhältnisse angestiegen ist. Es war daher fraglich, ob die Ressource Grundwasser im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung gesichert werden kann.

Für den Rhein-Neckar-Raum (Kreise Heidelberg, Mannheim und Rhein-Neckar-Kreis) sind daher Untersuchungen zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung und zum Grundwasserschutz durchgeführt worden. Sie hatten zum Ziel, Kriterien zu erarbeiten, mit deren Hilfe beurteilt werden kann, ob die Grundwasserbewirtschaftung in diesem Raum als nachhaltig bezeichnet werden kann. Diese Kriterien bilden zusammengenommen einen Beurteilungsrahmen, der Nutzer und Wasserbehörden bei Beurteilung der zukünftigen Grundwasserbewirtschaftung unterstützen soll.

In Stufe I des zweistufig angelegten Projekts wurden basierend auf der "Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum, 3.HGK Fortschreibung 1983-1998" (3.HGK, 1999) und dem vorhandenen, länderübergreifenden numerischen Grundwassermodell für dieses Gebiet Wasserbilanzen betrachtet. Darauf aufbauend wurden die Wechselwirkungen der Grundwasservorkommen in den Anrainerländern (Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz) herausgearbeitet. Ausgehend von den allgemeinen Nachhaltigkeitsdefinitionen wurden Kriterien für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung erarbeitet. Gemeinsam mit dem RP Karlsruhe, den Nutzern und dem Projektbeirat wurden Nutzungskonflikte definiert und die Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit hinterfragt.

In der Projektstufe II wurde das Untersuchungsgebiet auf den baden-württembergischen Teil des Modellgebiets konzentriert und das Grundwasserströmungsmodell um ein einfaches Transportmodul erweitert und für die Berechnung verschiedener Szenarien eingesetzt. Basierend auf den Rechenergebnissen wurden exemplarische Empfehlungen zur weiteren, nachhaltigen Bewirtschaftung des Aquifers herausgearbeitet.

## 1.2 Betrachtungsraum

Der dicht besiedelte Rhein-Neckar-Raum ist ein bedeutendes Wirtschaftszentrum, wobei die Region sich anteilig auf die Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen verteilt.

Die im Oberrheingraben gelegene Region zeichnet sich durch große Grundwasservorräte aus, deren intensive Nutzung als wichtiger Standortfaktor zur Entwicklung der Region beiträgt. Nutzung und Schutz der Grundwasservorräte im Ballungsraum machen eine Grundwasserbewirtschaftung erforderlich, welche den unterschiedlichen Nutzungsansprüchen und Schutzbedürfnissen verschiedener Interessengruppen gerecht werden muss.

Deshalb wurde schon vor 1980 in einer länderübergreifenden Kooperation das Grundwasservorkommen im Rhein-Neckar-Raum erkundet sowie die vorhandenen Nutzungen erfasst und in einer Hydrogeologischen Kartierung (1.HGK) dargestellt. Die HGK wurde in den zurückliegenden Jahrzehnten fortgeschrieben, verfeinert und ergänzt durch ein großräumiges numerisches Grundwassermodell (500 x 500 m Raster). Der aktuelle Stand hierzu ist dokumentiert in „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum, 3.HGK Fortschreibung 1983-1998“ (erschienen 1999). Der Betrachtungsraum ist in Abbildung 1.1 dargestellt.



Förderung im mittleren Grundwasserleiter (MGWL) hat sich die Potenzialdifferenz (Differenz der Druckspiegel) zwischen OGWL und MGWL großflächig umgekehrt (im Folgenden wird von einer Druckumkehr gesprochen). Während im natürlichen Zustand das Grundwasser in Rheinnähe aus dem MGWL aufgestiegen ist, wird nun Grundwasser aus dem OGWL nach unten gezogen. Damit einher kann eine Verschleppung von oberflächennahen Kontaminationen in bislang unbelastete tiefere Grundwasserschichten erfolgen. Auf die problematische Nutzung dieser tiefen Grundwässer hat die Akademie für Technikfolgenabschätzung in ihrer umfassenden Studie zum nachhaltigen Umgang mit Wasser in Baden-Württemberg bereits frühzeitig hingewiesen (Lehn et al., 1996).

Die großflächige, durch Entnahmen aus den tieferen Stockwerken induzierte Druckumkehr und der damit verbundene Wasseraustausch führt in kontaminierten Bereichen zwangsläufig zu einer Schadstoffverschleppung in die tieferen Stockwerke, die sich dort jedoch erst entsprechend zeitverzögert bemerkbar macht.

Vor diesem Hintergrund ergab sich als Zielsetzung für die vorliegende Studie, die Möglichkeiten und Grenzen einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung in diesem Ballungsraum aufzuzeigen, wobei die Betrachtungen sich auf den baden-württembergischen Teil der Region beschränkten (Kreise Heidelberg, Mannheim und Rhein-Neckar-Kreis).

Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass bei der Beschränkung auf Baden-Württemberg nur ein Teilbereich des Grundwassersystems betrachtet wird, der in das Gesamtsystem eingebunden ist. Zwar bilden die dominierenden Oberflächengewässer Rhein und Neckar eine hydraulische Grenze, die auch eine effektive Grenze für den oberen Grundwasserleiter darstellt. Dies gilt allerdings nicht mehr für die tieferen Stockwerke MGWL und UGWL – dort ergeben sich wechselseitige Beeinflussungen über die Flüsse bzw. über Landesgrenzen hinweg. Um auch diese Beeinflussungen zu erfassen, müssen Wasserbilanzen für alle Teilgebiete des Grundwassersystems aufgestellt werden.

Basierend auf grundsätzlichen Überlegungen zu einem nachhaltigen Umgang mit der Ressource Grundwasser werden Kriterien entwickelt, mit denen eine räumlich differenzierte Bewertung der nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum vorgenommen werden kann. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen nutzungsbedingten Eingriffen in den Grundwasserhaushalt und deren Auswirkungen auf das System einerseits und den hydrologisch bedingten natürlichen Schwankungen andererseits. Die vorliegende Studie beschränkt sich ausschließlich auf die Beeinflussung nutzungsbedingter Eingriffe, wohingegen steuernde wasserwirtschaftliche Maßnahmen (z.B. Grundwasseranreicherungen oder Absenkungsmaßnahmen) zur Kompensation natürlicher Schwankungen (Hochwasser- oder Niedrigwasserstände) nicht in Betracht gezogen werden.

Aus verschiedenen Bereichen der Landnutzung (Siedlung, Industrie und Verkehr, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz) resultieren unterschiedliche Anforderungen an das Grundwassersystem (z.B. Flurabstände) und seine Nutzung, die zu Interessenkonflikten führen können. Hierzu sollen die Bereiche aufgezeigt werden, die ein erhöhtes Konfliktpotenzial zwischen den jeweiligen Landnutzungsinteressen und dem Grundwassersystem aufweisen. Darüber hinaus ist es wichtig zu wissen, wie empfindlich das Grundwassersystem gegenüber Nutzungsänderungen reagiert und welche Effekte man durch eine Grundwasserbewirtschaftung erzielen kann.

Anhand von Szenariobetrachtungen werden die Grundlagen für die Beurteilung der Grundwasserbewirtschaftung ermittelt und ein Orientierungsrahmen für mittel- bis langfristige Entwicklung einer nachhaltigen Bewirtschaftungskonzeption dargestellt.

## **1.4    Arbeitsprogramm und Vorgehensweise**

Die vorliegende Studie wurde in zwei Phasen erarbeitet. Die erste Phase diente der Bestandsaufnahme sowie der Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit. Anschließend wurden die betroffenen Interessengruppen mit in die Studie einbezogen und realitätsnahe Prognoseszenarien definiert, die den Handlungsspielraum abstecken. In der zweiten Phase wurden dann zahlreiche Prognoseszenarien berechnet und im Licht der Kriterien diskutiert. Die Aggregation der zahlreichen denkbaren Szenarien auf eine überschaubare Zahl realitätsnaher

Varianten erfolgte im Projektbeirat, in dem die Vorschläge des IWS diskutiert und unter Einbeziehung der Erfahrungen der im Beirat vertretenen Stellen und der Erkenntnisse aus Umfrage und Workshop zu dem in Kapitel 6 dargestellten Untersuchungsrahmen komprimiert wurden. Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarienrechnungen bieten eine Beurteilungsgrundlage für die nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum.

#### 1.4.1 Ausgangsbasis und Referenzzustände

Ausgangsbasis für die Untersuchungen war die "Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum" (3.HGK, 1999) mit dem zugehörigen regionalen numerischen Grundwasserströmungsmodell. Dieses Modell wurde im Laufe der Studie den Erfordernissen zur Erfassung der Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität angepasst und ergänzt (Kapitel 2).

Mit Hilfe des Modells wurde zunächst der Ist-Zustand erfasst (Kapitel 3). Hierbei wurden die natürlichen Randbedingungen des Systems (Neubildung, Austauschraten) sowie die anthropogenen Einflüsse (Entnahmen) großräumig betrachtet und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten erfasst. Eine tiefendifferenzierte Betrachtung der Grundwasserleiter ermöglichte eine stockwerksbezogene Darstellung der Nutzungen und deren Auswirkungen auf Grundwasserstände und Austauschraten.

Als weitere Bezugsgröße für die Betrachtungen wurde mit dem vorhandenen Modell ein fiktiver "Nullzustand" berechnet, wobei im gesamten Modellgebiet keinerlei Entnahmen angesetzt wurden. Dieser Referenzfall gibt näherungsweise den natürlichen Urzustand (ohne Besiedlung) wieder.

Allerdings muss betont werden, dass weder der "Referenzzustand 1996" noch der "Nullzustand" (ursprünglicher natürlicher Zustand) mit einem wünschenswerten Zielzustand gleichgesetzt werden darf. Auch ist es nicht möglich, a priori einen exakten Zielzustand zu definieren.

#### 1.4.2 Nachhaltigkeitskonzept

Damit die "Nachhaltigkeit der Grundwasserbewirtschaftung" überhaupt bewertet werden kann, muss zunächst der Begriff näher definiert werden (Kapitel 4). Aus dieser Definition lassen sich dann einzelne Kriterien ableiten, welche die natürlichen Wasserbilanzen und Austauschraten, die nutzungsbedingten Veränderungen mit ihren langfristigen Auswirkungen, sowie die natürliche und anthropogen beeinflusste Qualität des Grundwassers beschreiben.

Für die Umsetzung einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte ist die Frage der gesellschaftliche Akzeptanz unabdingbar. Hierzu wurde die Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg (TA-Akademie) beauftragt, im Rahmen einer Befragung die Interessen und Problemlagen aller beteiligten Gruppen aus verschiedenen Entscheidungs- und Handlungsebenen zu identifizieren und auszuwerten (Kapitel 5). Nach dem Grundsatz "aus Betroffenen Beeilgte machen" wurde zunächst eine schriftliche Umfrage bei Nutzern und sonstigen Anspruchsgruppen wie Wirtschaft, Behörden, Natur- und Umweltschutzverbänden und der Landwirtschaft durchgeführt. Im Rahmen eines eintägigen Workshops wurden diese dann zum dialogorientierten Meinungsaustausch zusammengeführt, um mögliche Zielkonflikte heraus zu kristallisieren sowie gemeinsame Lösungsvorschläge im Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung des Grundwassers zu entwickeln. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienten mit als Grundlage für die Entwicklung der zu betrachtenden realitätsnahen Szenarien.

#### 1.4.3 Szenariobetrachtungen

Aus den gesammelten Erkenntnissen der Vorarbeiten (Kapitel 2 bis 5) wurden in Abstimmung mit dem Projektbeirat die relevanten Fragestellungen konkretisiert und Szenarien entwickelt, mit denen die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Ansätze zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung untersucht werden konnten. Hierbei lag der Fokus auf Änderungen der Entnahmen im baden-württembergischen Teilgebiet, die Entnahmen der beiden anderen Länder

wurden aus der 3.HGK übernommen und blieben unverändert. Die Modellergebnisse wurden entsprechend den zuvor aufgestellten Kriterien bewertet (Kapitel 6 und 7).

#### 1.4.4 Ergebnisse

Basierend auf den Resultaten der Szenariobetrachtungen und deren Bewertung wurde ein Orientierungsrahmen abgesteckt, der als Entscheidungshilfe für die mittel- und langfristige Planung einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung dienen soll. Allerdings muss die Studie beschränkt bleiben auf Leitlinien zu den wesentlichen und bedeutsamen Punkten und auf die Konzeption und Vorgehensweise bei der Umsetzung dieser Leitlinien.

Um die unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Interessengruppen in einem insgesamt nachhaltigen System berücksichtigen zu können, muss dieses räumlich und zeitlich sehr differenziert betrachtet werden. Sämtliche Wechselwirkungen und Auswirkungen auf die Bodenmatrix, auf Fließgewässer, auf Fauna und Flora, sowie deren jeweilige Bedeutung für Wasserversorgungsanlagen, Land- und Forstwirtschaft, Siedlungs- und Industrieaktivitäten, Altlasten und Landsetzungserscheinungen (um die wichtigsten zu nennen) sind dabei zu berücksichtigen.

Insofern ist die vorliegende großräumige Untersuchung als erster Schritt zu sehen, der die Methodik und den Rahmen aufzeigt, in dem weiterführende, lokale Betrachtungen durchgeführt werden sollten. Eine detailliertere Betrachtung (beispielsweise im Sinne einer Umweltverträglichkeitsprüfung) für spezifische Fragestellungen kann auf diesem Fundament aufsetzen und sich an den hier aufgestellten Leitlinien orientieren.

### 1.5 Abschlussberichte

Die vorliegende Kurzfassung der Studie zur Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit fasst die wesentlichen Ausführungen der Abschlussberichte des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart (Kobus & Mödinger, 2002) und der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg (Pfenning & Lehn, 2002) zusammen.

## 2. Numerisches Grundwassermodell

Im Rahmen der Fortschreibung der 3.HGK wurde auch das numerische Grundwasserströmungsmodell für den Rhein-Neckar-Raum weiterentwickelt (3.HGK, 1999).

Es basiert auf MODFLOW96 (Harbaugh & McDonald, 1988, 1996), ein auf finite Differenzen basierendes gitterzentriertes Grundwasserströmungsmodell. Das dreidimensionale Modell wurde als Nord-Süd orientiertes, regelmäßiges Quadratnetz mit Knotenabständen von 500 m aufgebaut und umfasst mit 5220 Zellen in einer Ebene eine Fläche von ungefähr 1300 km<sup>2</sup>. Fünf Grundwasserleiter mit vier (nicht explizit modellierten) Trennhorizonten bilden den vertikalen Aufbau. Für eine ausführliche Beschreibung des Modellaufbaus wird auf die 3.HGK verwiesen.

Das von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) zur Verfügung gestellte Programmsystem wurde unter der Annahme übernommen, dass das vorliegende Modell hinreichend genau kalibriert und verifiziert worden ist und so als wichtiges Hilfsmittel zur Klärung der spezifischen Fragestellungen in der Untersuchung eingesetzt werden konnte.

Eine Anpassung des Modells an den Untersuchungsraum Teilgebiet Baden-Württemberg wurde nicht vorgenommen. Dies hätte die Erstellung neuer Randgeometrien und Randbedingungen erforderlich gemacht, und damit eine erneute Kalibrierung und Verifizierung des Modells nach sich gezogen. Da auch die Rechenzeit kein maßgeblicher Faktor war, wurde immer mit dem Gesamtmodell gerechnet, wobei sich die Betrachtungen und Auswertungen im Wesentlichen auf den baden-württembergischen Teil konzentriert haben.

### 2.1 Anpassung des Modells

Das Modell beinhaltet einige LfU-Modifikationen des Original-MODFLOW96 Codes, so dass Modellein- und ausgabedaten von anderen Programmen teilweise nicht mehr eingelesen werden können, welche speziell zur Auf- und Nachbereitung der Daten für MODFLOW entwickelt worden sind und für die Studie verwendet werden sollen. Deshalb musste eine Anpassung an die originale Datenstruktur von MODFLOW erfolgen:

- Implementierung der Randströme über ein schon in MODFLOW integriertes Programmmodul  
Bisher geschah dies über ein durch die LfU hinzugefügtes Modul.
- Keine gesonderte Betrachtung der zusätzlichen Beregnungsentnahmen  
Da keine Notwendigkeit einer gesonderten Betrachtung in der Wasserbilanz bestand, wurden die zusätzlichen Beregnungsentnahmen als normale Entnahmen behandelt.
- Berücksichtigung unterschiedlicher Austauschkoefizienten für Infiltration bzw. Exfiltration von Oberflächengewässern  
Da als neue Modellbasis das weiterentwickelte MODFLOW2000 (Harbaugh et al., 2000) verwendet wurde, musste diese Modifikation der LfU in den Programmcode implementiert werden, um die Modellergebnisse mit MODFLOW96 exakt reproduzieren zu können.
- Externe Erstellung der Wasserbilanzen  
Die LfU implementierte die Bilanzierung der einzelnen Wasserströme innerhalb des Programmcodes von MODFLOW und unterband somit eine Ausgabe des Budget-Files, welches für an MODFLOW anschließende Programme notwendig ist. Durch den Einsatz von MODFLOW2000 war die Ausgabe des Budget-Files wieder hergestellt. Für die Bilanzierung wird ZONEBDGT (Harbaugh, 1990) verwendet, ein Postprocessing-Programm im Rahmen der MODFLOW-Familie des United States Geological Survey (USGS).

## 2.2 Erweiterung des Modells

Eine Erweiterung des Modells war notwendig, da die spezifischen Fragestellungen der Studie nicht oder nur unzureichend mit dem zur Verfügung gestellten Modell bearbeitet werden konnten:

- Erweiterung des Modells um ein einfaches Transportmodul

Zur Berechnung von Wasserbilanzen und Grundwasserständen ist ein Modell zur Grundwasserströmungsberechnung ausreichend. Um allerdings die Voraussetzungen für eine erste Einschätzung der Grundwasserqualität zu haben, ist die Kenntnis der Bahnlinien (Strömungspfade) notwendig. Daraus lassen sich auch mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete ableiten. Hierzu wurde MODPATH (Pollock, 1994), ein Particle-Tracking Post-Processing-Programm eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein rein advektives Transportmodell, das die Bahnlinien einzelner Wasserteilchen berechnet.

- Kopplung der Grundwasserstände mit einem digitalen Geländemodell

Der Flurabstand ist ein wichtiger Bewertungsparameter in dieser Studie. Er berechnet sich aus der Differenz zwischen Geländeoberkante und dem Grundwasserstand. Die Information über die Geländeoberkante steckt im digitalen Geländemodell (DGM) auf einem 50 x 50 m Raster. Da die Grundwasserstände vom numerischen Grundwassermodell auf einem 500 x 500 m Raster berechnet werden, werden sie mittels bilinearer Interpolation auf das 50 x 50 m Raster gebracht (Press et. al., 1992).

- Berechnung, Auswertung und Visualisierung der Parameter und Kriterien

Die Berechnung und Auswertung erfolgt (außer für die Transportberechnungen) durch ein eigens dafür entwickeltes Programm (in FORTRAN). Damit war es möglich, die manuell sehr zeitaufwendige Datenverarbeitung und Datenaufbereitung zu automatisieren. Die Visualisierung erfolgte mit TECPLOT (Amtec Engineering, 1999).

## 2.3 Auswertungsmöglichkeiten

Mit den oben beschriebenen Anpassungen und Ergänzungen ist es nun möglich verschiedene Parameter auswerten zu können, die zur Bewertung der Nachhaltigkeit herangezogen werden:

- Zu- und Abflüsse, Wasserbilanzen

Das Grundwasserströmungsmodell liefert alle Zu- und Abströme einer Zelle. Die einzelnen Ströme sind lokale Quellen und Senken (Entnahmen, Austausch mit Oberflächengewässer), vertikale Ströme (Austausch mit Grundwasserstockwerken, Neubildung durch Niederschlag) und horizontale Ströme (Randströme, Austausch mit seitlichen Nachbarzellen).

Eine entsprechende Bilanzierung dieser Ströme ermöglicht die Erstellung von Wasserbilanzen von zuvor definierten Teilgebieten.

Entscheidend bei der Betrachtung der Druckumkehr bzw. Tiefenverfrachtung von Schadstoffen sind die vertikalen Austauschraten zwischen OGWL und MGWL, die gesondert betrachtet werden.

- Mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete

Die Laufzeit eines Teilchens entlang einer Bahnlinie gibt Aufschluss über die mittlere Verweilzeit. Darüber hinaus lassen sich auch Abschnitte der Bahnlinien gesondert betrachten, beispielsweise bei einem Absinken des Grundwassers aus dem OGWL in den MGWL. In der

vorliegenden Studie bezieht sich die Verweilzeit auf die Zeit, die ein Wasserteilchen vom Eintritt an der freien Grundwasseroberfläche bis zum Verlassen des Systems benötigt.

- Grundwasserstände und Flurabstände

Neben den Grundwasserständen und den Flurabständen sind verschiedene Differenzen und Verhältnisse von Grundwasserständen und deren Schwankungsbreite von Interesse.

Grundwasserspiegeländerungen werden immer auf ein und denselben Referenzzustand bezogen. Sie berechnen sich einfach aus der Differenz zwischen den Grundwasserständen der aktuellen Rechnung und denen des Referenzzustands.

Um den durch Grundwasserbewirtschaftung verursachten Einfluss zu erkennen, werden die entnahmebedingten Absenkungen bestimmt. Hierzu wird, unter sonst gleichen Bedingungen, jedes Szenario einmal mit allen Entnahmen und einmal ohne jegliche Entnahmen (Entnahmeraten gleich Null) gerechnet. Die so ermittelte Differenz der Grundwasserstände ist damit die entnahmebedingte Änderung.

Als Vergleichsgröße zu den entnahmebedingten Änderungen der Grundwasserstände dienen die hydrologisch bedingten Schwankungen der Grundwasserstände. Hierbei wird, unter Annahme einer Null-Entnahme (alle Entnahmen gleich Null), die maximale Differenz der Grundwasserstände für verschiedene hydrologische Randbedingungen (Trocken-, Normal- und Nassjahr) berechnet. Mit dem Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zu den hydrologischen Schwankungen lassen sich dann die Bereiche identifizieren, in denen die Grundwasserbewirtschaftung bzw. die Hydrologie dominiert.

Welche Rolle diese Parameter bei der Bewertung spielen wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

### 3. Ausgangslage

Als Ausgangszustand für die Bestandsaufnahme wurde die Entnahmesituation, wie sie sich im Jahr 1996 dargestellt hat, gewählt (Abbildung 3.1). Dies ist die aktuellste, auf Grundlage der 3.HGK verfügbare Datengrundlage. Im Weiteren wird diese Entnahmesituation auch als Referenzzustand 1996 bezeichnet.

Baden-Württemberg entnimmt 85.5 mio m<sup>3</sup>/a, was einem Anteil von über 50% des geförderten Grundwassers im gesamten Modellgebiet entspricht. Die öffentlichen Wasserversorger entnehmen davon 62%, die industriellen Brauchwasserentnahmen machen 36% aus, die restlichen 2% entfallen auf landwirtschaftliche Beregnungsentnahmen. Das Grundwasser kommt zu ähnlich großen Anteilen aus dem OGWL und dem MGWL, die Entnahme aus dem UGWL ist verschwindend gering.

In Rheinland-Pfalz (Gesamtentnahme 52.1 mio m<sup>3</sup>/a) sind die entnahmespezifischen Anteile ähnlich der prozentualen Aufteilung in Baden-Württemberg. Allerdings werden hier nur 4% aus dem OGWL gewonnen, der Hauptanteil kommt mit 59% aus dem MGWL und mit 37% aus dem UGWL. Dies lässt sich mit der geringen Mächtigkeit des OGWL, sowie des oberflächennahen MGWL auf der linksrheinischen Seite erklären.

Hessen ist mit einer Gesamtentnahme von 24.1 mio m<sup>3</sup>/a der kleinste Entnehmer im Modellgebiet, wobei hier die landwirtschaftlichen Beregnungsentnahmen im südhessischen Ried mit 29% einen großen Teil ausmachen. Die privatwirtschaftlichen Entnahmen sind mit 2% sehr gering, den Hauptteil mit 69% machen, wie auch in den beiden Nachbarländern, die öffentlichen Wasserversorger aus. Ähnlich wie in Baden-Württemberg kommt auch hier fast die gesamte Entnahme aus dem OGWL (38%) und dem MGWL (62%), die Entnahme aus dem UGWL ist im Vergleich dazu sehr klein.

Für den Referenzzustand 1996 wurde mit den hydrologischen Randbedingungen eines Normaljahrs eine Modellberechnung zur Beschreibung der Wasserbilanz durchgeführt. Die Tabellen 3.1 bis 3.3 zeigen die Wasserbilanz für das baden-württembergische Teilgebiet, unterteilt in die drei Grundwasserstockwerke.

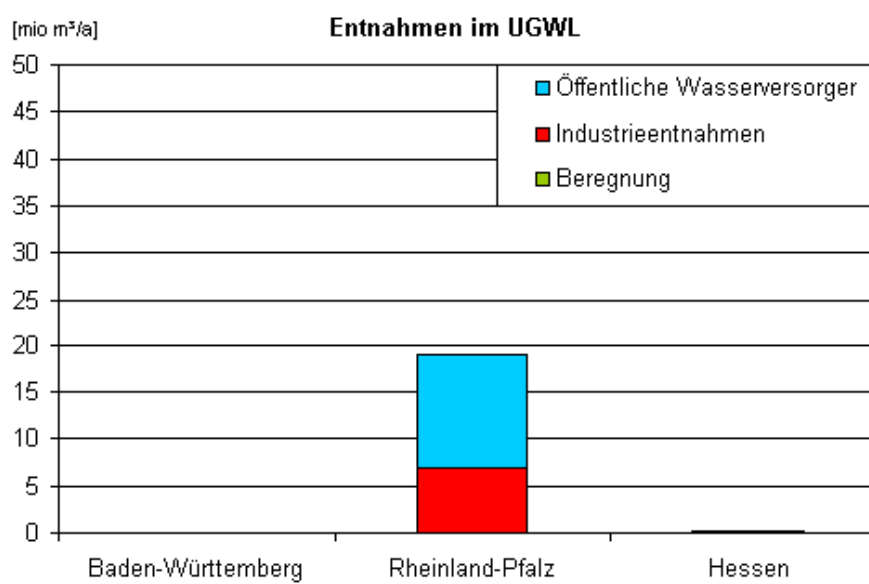
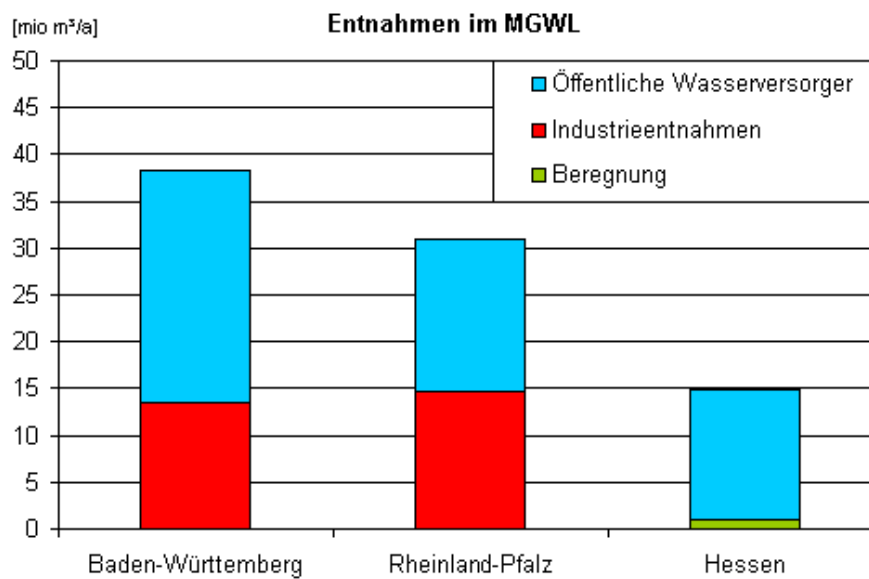
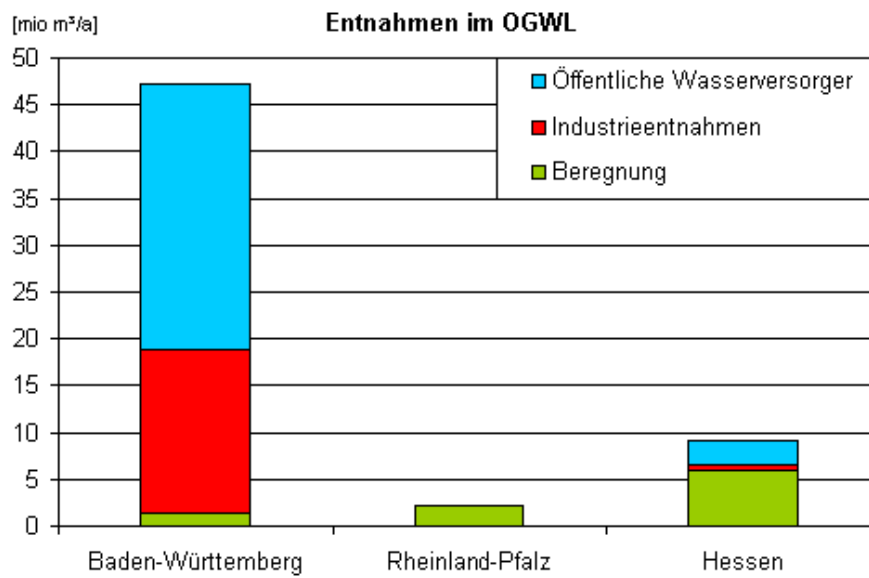
Man erkennt deutlich, dass über den Westrand des Teilgebiets Baden-Württemberg ein Abstrom stattfindet (hin zu Rhein und Rheinland-Pfalz). Der Austausch mit Hessen im Norden ist trotz der höheren Zu- und Abströme fast ausgeglichen. Dies lässt sich mit der Linienführung der administrativen Grenzen erklären. Da die regionale rechtsrheinische Strömungsrichtung ziemlich genau von Osten nach Westen zeigt (in Richtung Rhein), fließt das Grundwasser zwischen Heppenheim und Weinheim vom baden-württembergischen Gebiet durch den bis Viernheim reichende hessischen Zipfel und fließt dann wieder zwischen Lampertheim und Mannheim dem baden-württembergischen Teil zu.

Weiterhin fällt insbesondere der hohe vertikale Austausch zwischen OGWL und MGWL auf, der in etwa die selbe Größenordnung hat wie die Entnahmerate aus dem MGWL.

Sehr interessant ist der Vergleich der Entnahmerate mit der Neubildung in Baden-Württemberg. Nach DIN 4049 wird die Grundwasserneubildung als "Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser" definiert, wobei nicht zwischen natürlichem und anthropogen bedingtem Zugang unterschieden wird.

Die Nutzung des erneuerbaren Grundwassers im baden-württembergischen Teilgebiet übersteigt mit 117% die örtliche Neubildung durch Niederschlag. Betrachtet man jedoch die Gesamtwasserbilanz einschliesslich Neubildung aus Niederschlag, Randzuflüsse über den südlichen und östlichen Modellrand sowie Infiltration aus Oberflächengewässern, so ergibt sich ein Nutzungsgrad von 53%.

Dabei ist zu beachten, dass die Infiltration aus Oberflächengewässern nur zum Teil natürlich bedingt ist, da der Austausch mit Oberflächengewässern in direkter Beziehung zu den Grundwasserständen, und damit zu entnahmebedingten Absenkungen selbst, steht.

Abbildung 3.1: Entnahmemengen 1996 im Modellgebiet [mio m<sup>3</sup>/a]

Wasserbilanz OGWL BW [mio m <sup>3</sup> /a]	Zufluss	Abfluss	Gesamt
Entnahmen	± 0.0	- 47.2	- 47.2
Neubildung (Niederschlag)	+ 72.8	± 0.0	+ 72.8
Randströme	+ 16.1	± 0.0	+ 16.1
Austausch mit Oberflächengewässer	+ 70.4	- 52.1	+ 18.3
vertikaler Austausch mit MGWL	+ 2.2	- 44.9	- 42.7
horizontaler Austausch mit Hessen	+ 11.5	- 13.6	- 2.1
horizontaler Austausch mit Rhein	+ 4.4	- 19.6	- 15.2
Summe	+ 177.4	- 177.4	± 0.0

Tabelle 3.1: Wasserbilanz OGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m<sup>3</sup>/a]

Wasserbilanz MGWL BW [mio m <sup>3</sup> /a]	Zufluss	Abfluss	Gesamt
Entnahmen	± 0.0	- 38.2	- 38.2
Randströme	+ 1.7	± 0.0	+ 1.7
vertikaler Austausch mit OGWL	+ 44.9	- 2.2	+ 42.7
vertikaler Austausch mit UGWL	+ 3.8	- 4.7	- 0.9
vertikaler Austausch mit Rhein	+ 1.3	- 2.4	- 1.1
horizontaler Austausch mit Hessen	+ 6.9	- 1.6	+ 5.3
horizontaler Austausch mit Rheinland-Pfalz	+ 3.9	- 13.4	- 9.5
Summe	+ 62.5	- 62.5	± 0.0

Tabelle 3.2: Wasserbilanz MGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m<sup>3</sup>/a]

Wasserbilanz UGWL BW [mio m <sup>3</sup> /a]	Zufluss	Abfluss	Gesamt
Entnahmen	± 0.0	- 0.0	± 0.0
Randströme	± 0.0	± 0.0	± 0.0
vertikaler Austausch mit MGWL	+ 4.7	- 3.8	+ 0.9
horizontaler Austausch mit Hessen	+ 1.3	- 0.4	+ 0.9
horizontaler Austausch mit Rheinland-Pfalz	+ 1.9	- 3.7	- 1.8
Summe	+ 7.9	- 7.9	± 0.0

Tabelle 3.3: Wasserbilanz UGWL Baden-Württemberg, Referenzzustand 1996 [in mio m<sup>3</sup>/a]

## 4. Nachhaltigkeit in der Grundwasserbewirtschaftung

### 4.1 Definitionen

Der Begriff "Nachhaltigkeit" kommt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und findet sich mittlerweile in allen möglichen Bereichen der Gesellschaft, ohne jedoch genauer definiert zu sein. Ausgangspunkt der heute verwendeten Begrifflichkeit ist ein Zitat aus dem Brundtland-Report (World Commission on Environment and Development, 1987):

"Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"

"Nachhaltige Entwicklung ist Entwicklung, die die gegenwärtigen Bedürfnisse deckt, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zur Deckung ihrer eigenen Bedürfnisse einzuschränken."

Daraus lassen sich konkretere Grundanforderungen an eine nachhaltige Entwicklung formulieren (Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des 12. Deutschen Bundestages, 1993; United Nations Conference on Environment and Development, 1992), die alle eine angemessene Berücksichtigung und Verknüpfung ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Aspekte zum Ziel haben (Abbildung 4.1).

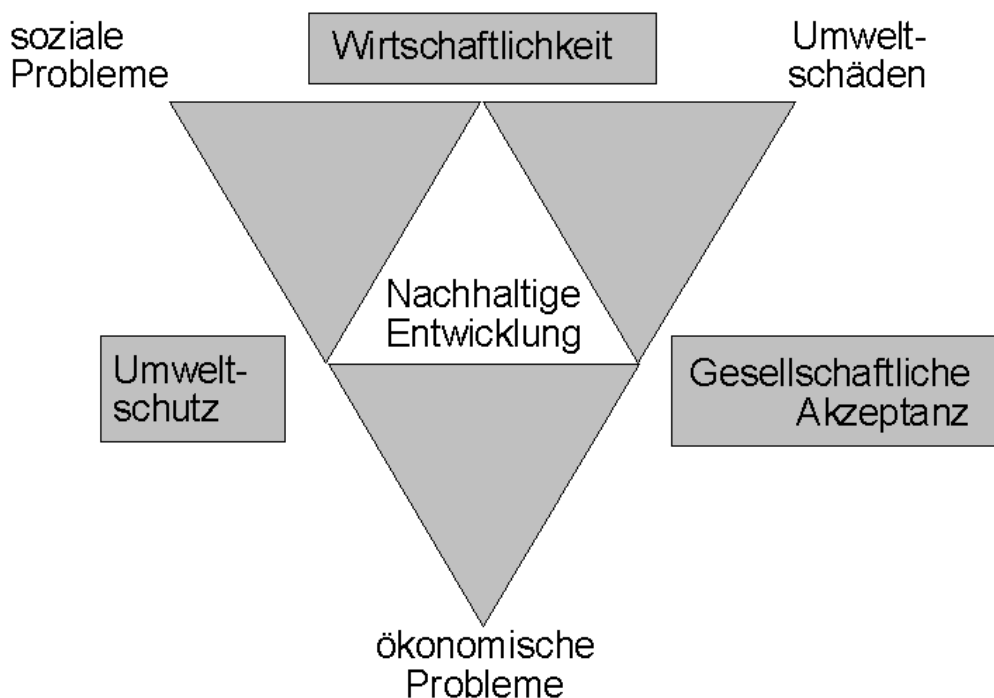


Abbildung 4.1: Nachhaltigkeitsdreieck

Nach Kobus (1996, 1999) werden diese allgemeinen Prinzipien für die nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen weiter spezifiziert:

- Ausgeglichene Wasserbilanz unter Berücksichtigung des Wasserbedarfs der Natur, d.h. keine Übernutzung der vorhandenen Grundwasserressourcen.

Hier ist zu beachten, dass Grundwasserentnahmen die Grundwasservorräte reduzieren, die als natürliche Basis für Fauna und Flora zur Verfügung stehen. Für das Gesamteinzugsgebiet kann deshalb als eine Hypothese gefordert werden, dass die Summe der Entnahmen stets deutlich kleiner sein muss als der natürliche Wasserumsatz (Orientierungsvorschlag 20%).

Allerdings muss für Grundwasserleiter, die in direkter Wechselwirkung mit großen Oberflächengewässern stehen, beachtet werden, dass jegliche Änderung der Entnahmeraten durch Veränderungen der Infiltrations- bzw. Exfiltrationsraten ausgleichen werden kann, wobei die Austauschraten in Relation zum Gesamtabfluss sehr klein sind und damit praktisch keine Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse der Oberflächengewässer haben.

Im Zusammenhang mit dem Grundwasserdargebot sind auch die Grundwasserflurabstände zu sehen, die insbesondere bei grundwasserabhängigen Ökosystemen und Landnutzungen eine entscheidende Rolle spielen.

- Erhaltung der Wasserzirkulation bei naturnahen Verweilzeiten zur Sicherung der Wasserbeschaffenheit (bzw. der damit verbundenen geogenen und biochemischen Prozesse) und der Grundwasserstände.

Die geogene Grundwasserbeschaffenheit resultiert aus den physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen zwischen Wasser und Korngerüst bzw. Bodenmatrix. Wenn durch Eingriffe die Fließgeschwindigkeiten und damit auch die Kontaktzeiten stark verändert werden, kann dies je nach Zeitmaßstab der jeweiligen Prozesse zu Veränderungen der geogenen Grundwasserbeschaffenheit führen.

- Keine bzw. zeitlich begrenzte Nutzung fossiler Grundwässer

Fossile Grundwässer sind nicht regenerierbare Grundwasservorkommen. Eine Nutzung sollte, wenn überhaupt, nur eine Not- bzw. Übergangslösung sein, die nur solange genutzt wird, bis anderweitige nachhaltige Lösungen entwickelt sind und wirksam eingesetzt werden können. Dieses Kriterium ist für die vorliegende Untersuchung ohne Bedeutung.

- Grundwasserbelastungen durch Stoffeinträge dürfen das Selbstreinigungsvermögen des Untergrunds nicht überschreiten (vorsorgender Grundwasserschutz)

Grundwassersysteme haben ein gewisses Selbstreinigungsvermögen ("natural attenuation"), das bei ausreichender Verweilzeit bzw. Laufstrecke zur Elimination von Schadstoffen führt (Adsorption, Filterwirkung, chemische Umsetzungen und biologischer Abbau). Wird dieses Selbstreinigungsvermögen überschritten, so müssen Grundwassersanierungsmaßnahmen ergriffen werden, die extrem kostspielig werden können.

- Keine nachteilige Beeinflussung von Nachbarregionen

Änderungen der Entnahmen bedeuten Änderung der Grundwasserverhältnisse in einem bestimmten Raum. Dies kann eine Änderung der Randströme sowie eine Änderung des Austauschs mit Oberflächengewässern bedeuten, und sich somit auch auf Nachbarregionen auswirken, wobei nachteilige Beeinflussungen grundsätzlich vermieden werden müssen.

- Berücksichtigung der gesellschaftlichen Anforderungen (Trinkwasser, Arbeitsplätze, Landnutzung), die teilweise auch untereinander konkurrieren.

Die Versorgung der Bevölkerung mit sauberem Trinkwasser hat höchste Priorität. Allerdings müssen die konkurrierenden Nutzungsinteressen an Grundwasser und Landnutzung gegeneinander abgewogen werden, in ihren Wechselwirkungen quantifiziert und hinsichtlich der anfallenden Kosten spezifiziert werden, damit eine sachgerechte Abwägung erfolgen kann und die gesellschaftliche Akzeptanz der zu treffenden Bewirtschaftungsmaßnahmen sichergestellt werden kann.

## 4.2 Bewertungskriterien

Die vorliegende Studie befasst sich mit den wasserwirtschaftlichen Aspekten einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung. Diese bildet die konzeptionelle und quantitative Basis für eine umfassende Betrachtung im Sinne einer Ökobilanz, die zukünftig an dieser Stelle ansetzen kann. Allerdings werden auch die Schnittstellen zu anderen Disziplinen angesprochen.

Im Folgenden werden deshalb generelle Kriterien für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung aufgestellt, die für eine detailliertere lokale Betrachtung weiter differenziert werden müssen. Lokalspezifische Aussagen erfordern lokalspezifische Kenntnisse und Daten, welche in der HGK schon aus modelltechnischen Gründen (Modellraster 500 x 500 m) nicht enthalten sein können.

### 4.2.1 Zu- und Abflüsse, Wasserbilanzen

Entsprechend der oben aufgeführten Definitionen zur Nachhaltigkeit dürfen die Entnahmen die Neubildung unter Berücksichtigung des Bedarfs der Natur und der Unterlieger nicht übersteigen. Meist ist jedoch der natürliche Bedarf unbekannt, bzw. ist aufgrund des komplexen natürlichen Systems (Vegetation, Basisabfluss) nur schwer zu erfassen und modelltechnisch festzulegen.

Die Wasserbilanz liefert auch den Austausch und die Interaktion mit Nachbarregionen und Unterliegern. Damit ergibt sich eine quantitative Basis zur Erörterung der gegenseitigen Beeinflussung.

### 4.2.2 Mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete

Die Wasserqualität ist eines der wichtigsten Kriterien. Gerade im Rhein-Neckar-Raum war die Minderung der Wasserqualität im OGWL ein Grund für die Verlagerung der Entnahmen in tiefere Stockwerke. Allerdings stellt dies keine Lösung des Qualitätsproblems dar, sondern lediglich eine zeitliche Verschiebung.

Die Verschleppung von Kontaminationen in bislang saubere Grundwässer ist somit als nicht nachhaltig zu sehen, sofern dies einen Dauerzustand darstellt.

Grundsätzlich gilt es aber, die Verschmutzungsquellen zu vermeiden bzw. soweit nur irgendwie möglich zu beseitigen.

Mit einer ersten Bestimmung der Fließwege, und damit der Einzugsgebiete und mittleren Verweilzeiten, werden die Voraussetzungen geschaffen um Grundwasserkontaminationen in einer Bewertung berücksichtigen zu können.

### 4.2.3 Grundwasserstände und Flurabstände

Der Flurabstand spielt bei jeder Art von Landnutzung eine wichtige Rolle. Land- und Forstwirtschaft haben unterschiedliche Anforderungen sowohl an den Flurabstand (Tiefe des Grundwasserspiegels unter Geländeoberfläche) als auch an die jahreszeitliche Dynamik der Grundwasserstände. Zu berücksichtigen sind hierbei auch Bodenart und Vegetation. Da mit dem hier eingesetzten stationären

grobrastrigen Modell eine Differenzierung in Bodenarten und Vegetation(-perioden) nicht möglich ist, wird hier als erste grobe Klassifizierung unterschieden zwischen trockenen und feuchten Standorten bei den Waldgebieten und bei der Landwirtschaft zwischen Ackerland und Grünland. Da Naturschutzgebiete (NSG) in der Regel sehr empfindlich auf Grundwasserstandsschwankungen reagieren, ist Toleranz gegenüber Schwankungen sehr stark eingeschränkt. In Siedlungsgebieten können Vernässungsschäden dann auftreten, wenn der Grundwasserstand die Bausubstanz erreicht. Außerdem muss bei entsprechendem Baugrund mit Setzungen gerechnet werden, wenn Grundwasserabsenkungen über ein bestimmtes Maß hinaus gehen (Differenzwerte  $\Delta h$ ).

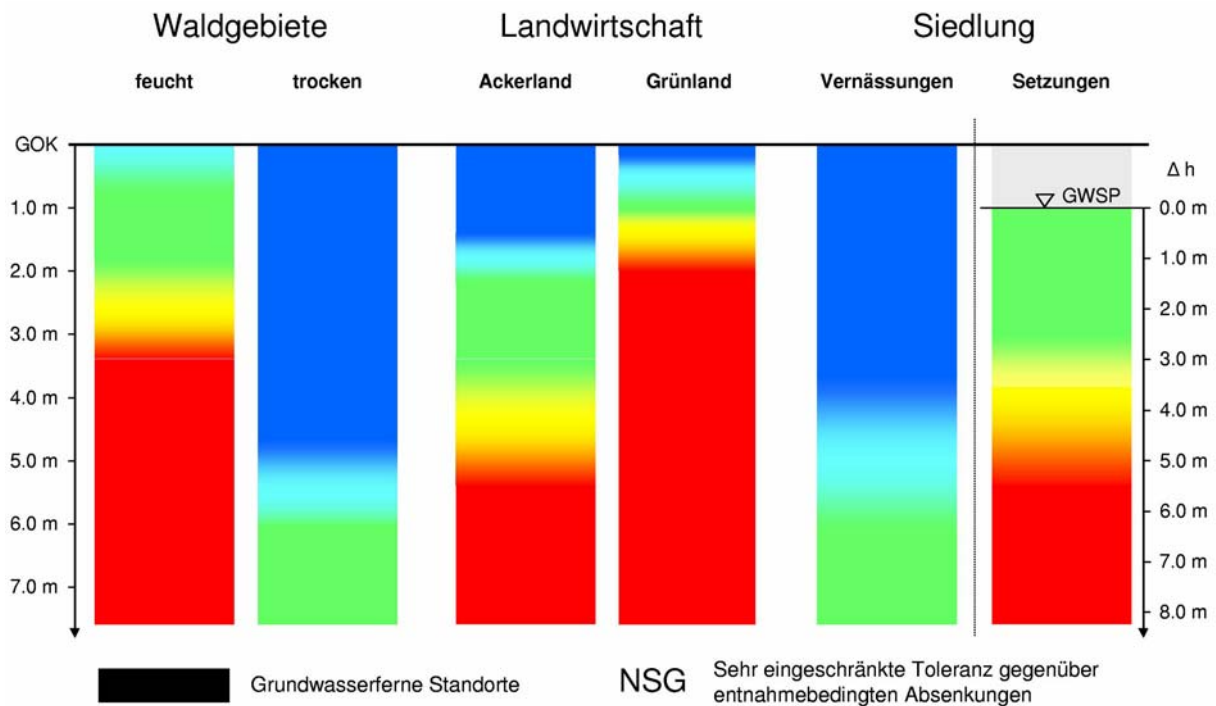


Abbildung 4.2: Bewertungsbandbreiten Flurabstand

Das Schaubild in Abbildung 4.2 zeigt eine Bewertungsbandbreite für den Flurabstand im Hinblick auf die verschiedenen Landnutzungsarten auf. Sollte sich der Flurabstand im blauen Bereich befinden, so ist der Grundwasserstand als zu hoch anzusehen (Vernässung), während er im roten Bereich als zu niedrig einzustufen ist (weil z.B. die Pflanzenwurzeln den Grundwasseranschluss verlieren). Flurabstände im grünen Bereich bedeuten gute Bedingungen für die entsprechende Landnutzung. Bei den Setzungen bezieht sich die Skala auf die maximale Differenz zwischen zwei Grundwasserständen. Bei der Beschreibung der Modellergebnisse in Kapitel 7 wird bei der Einschätzung des Grundwasserstands für die Landnutzung auf dieses Bewertungsschema zurückgegriffen. Schwarz dargestellte Flächen zeigen grundwasserferne Standorte an, die von einer Bewertung ausgenommen sind.

Bei dieser Betrachtung ist auch die Stabilität der Bewertung von Interesse. Wie in Kapitel 6.3 erklärt, werden Szenarien für verschiedene hydrologische Randbedingungen gerechnet und bewertet. Wenn die Ergebnisse einer Szenarios für alle Randbedingungen zeigen, dass die Flurabstände im etwa selben Bewertungsbereich liegen (z.B. alle im blauen Bereich), so ist die Bewertung als stabil zu bezeichnen und bei entsprechender absoluter Bewertung des Flurabstands (grüner Bereich) als Standort für die Landnutzung langfristig geeignet. Sollte die Bewertung allerdings mit den hydrologischen Bedingungen schwanken, so weist dies auf einen Standort mit hoher Sensibilität bezüglich einer Grundwasserbewirtschaftung und der daraus resultierenden Änderungen der Grundwasserstände im OGWL im Hinblick auf die entsprechende Landnutzung hin.

## 5. Gesellschaftliche Akzeptanz nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung

Zielsetzung ist es, einen Überblick über die Bedeutung dieser Frage bei den Anspruchsgruppen zu erhalten und ggfs. Kriterien und Handlungsoptionen zur gesellschaftlichen Akzeptanz bei den involvierten Institutionen und Verbänden zu erarbeiten.

### 5.1 Konzept und Methodik

Um einen Überblick über die Interessen der Anspruchsgruppen („Stakeholder“) bezüglich der Nutzung des Grundwassers zu erhalten, wurde eine mit Auftraggeber und Experten der Landesverwaltung abgestimmte schriftliche Umfrage bei Wirtschaftsverbänden (einschließlich Forst- und Landwirtschaft), Fach- und Genehmigungsbehörden, Natur- und Umweltschutzverbänden und der Landwirtschaft durchgeführt. Der Fragebogen beinhaltete die Bewertung von fachlichen Aussagen ebenso wie Fragen über Einstellungen zur Nachhaltigkeit, Problemlagen, Lösungsvorschlägen, Schadensentwicklungen und Handlungsoptionen. Die Ergebnisse der Umfrage wurde in einem eintägigen Workshop thesenhaft dargestellt und diskutiert.

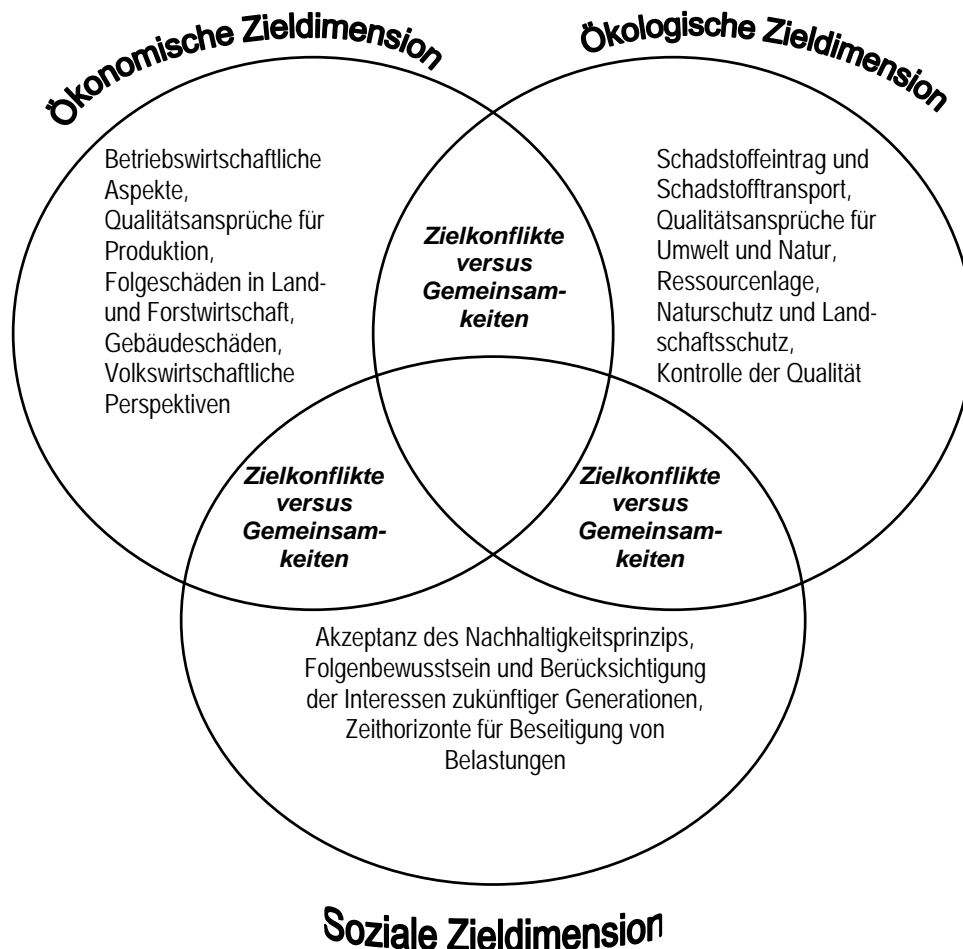


Abbildung 5.1: Bezug von Inhalten des Fragebogens zu den drei Zieldimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomische, ökologische und soziale Zieldimension)

## 5.2 Ergebnisse aus Umfrage und Workshop

- Erreichen der involvierten Anspruchsgruppen

Insgesamt beteiligten sich 77% (n=27) der angeschriebenen Anspruchsgruppen und involvierten Behörden an der Erhebung, wobei Umwelt- und Naturschutzverbände mit 100% die höchste, Industrieunternehmen mit 57% die geringste Beteiligungsquote aufwiesen.

Gruppenzuordnung und Anzahl angeschriebener Adressaten (n)	Rücklauf		gruppenspezifischer Anteil	
	abs.	in %		
Wasserversorgungsunternehmen	7	5	71	18,5 %
Behörden / Ämter /Forstwirtschaft	12	9	75	33,3 %
darunter aus:				
Hessen		(1)		
Rheinland-Pfalz		(1)		
Kommunale Behörden	2	2	100	7,4 %
Industrieunternehmen / Dachverband	7	4	57	14,8 %
Selbständige fachliche Beratungsinstitutionen*		1	100	3,7 %
Umwelt- und Naturschutzverbände	4	4	100	14,8 %
Landwirtschaft / Verbraucherschutz*	2	2	100	7,4 %
<b>Insgesamt:</b>	<b>35</b>	<b>27</b>	<b>77</b>	<b>99,9 %</b>

\* Diese Anspruchsgruppen firmieren insgesamt unter dem Etikett „NGO“

Tabelle 5.1: Rücklaufquoten (in %) für einzelne Zielgruppen der Erhebung

Umfrage und Workshop orientierten sich an sechs Themenbereichen, mit denen die drei Zieldimensionen einer nachhaltigen Entwicklung gebührend abgebildet werden. Die nachfolgende Darstellung der Ergebnisse gliedert sich entsprechend dieser Themen.

- Thema 1: Akzeptanz von Nachhaltigkeitsprinzipien im Umgang mit Grundwasser

Die im Fragebogen aufgeführten Aussagen zur nachhaltigen Wassernutzung leiten sich aus dem allgemeinen normativen Konzept der Nachhaltigkeit ab. Dies sind die Fragen zur Berücksichtigung der Interessen nachfolgender Generationen (intergenerative Gerechtigkeit), der Berücksichtigung regionaler Zusammenhänge (intragenerative Gerechtigkeit), der Erneuerungsrate der Ressource Wasser als Bewirtschaftungsbasis, zum mittelfristigen Abbau von bestehenden Verschmutzungen sowie zur Balance zwischen anthropogener Nutzung und natürlichen Kreisläufen. Diese allgemeinen Nachhaltigkeitskriterien werden von allen Stakeholdern gleichermaßen eindeutig positiv beurteilt und politisch als Leitwerte akzeptiert.

Hinsichtlich ihrer Konkretisierung ergeben sich jedoch Einschränkungen. So beurteilen die Wasserversorgungsunternehmen die Grundwasserneubildung als Bewirtschaftungsbasis relativ kritisch, die NGO-Verbände erwarten Akzeptanzprobleme bei gravierenden Eingriffen zur Verminderung von stofflichen bzw. thermischen Belastungen des Grundwassers.

- Thema 2: Beurteilung der wasserwirtschaftlichen Situation nach Verfügbarkeit und Qualität

In der Gesamtbewertung ist festzustellen, dass gegenwärtig die Qualität des Grundwassers als Problem erscheint, nicht jedoch dessen Verfügbarkeit. Es wird antizipiert, dass das Thema

„Grundwasserqualität“ in der Zukunft wegen der Druckumkehr zwischen oberem und mittlerem Grundwasserleiter sowie wegen der Schadstoffeinträge an Dringlichkeit gewinnt. Dies weist auf die Notwendigkeit von zu ergreifenden Vorsorgemaßnahmen hin.

Soweit es die Verfügbarkeit von Grundwasser betrifft, werden keine Versorgungsengpässe befürchtet. Für die Zukunft werden überwiegend stagnierende bis sinkende Bedarfe der Grundwassernutzung erwartet. Vor allem die Behörden gehen von diesem Trend aus. Einige Wasserversorgungsunternehmen, Umweltgruppen und Wirtschaftsunternehmen äußern allerdings hierzu gegenläufige Einschätzungen.

Informationen über die Qualität des Grundwassers sind offensichtlich nicht allgemein verfügbar. Lediglich 14 befragte Zieladressaten beantworten die Frage, ob das verwendete Grundwasser für ihre Zwecke Trinkwasserqualität aufweisen muss, 12 davon mit „ja“. Insbesondere die Wasserversorgungs- und Wirtschaftsunternehmen sind hinsichtlich der hohen Qualitätsansprüche an das Grundwasser eindeutig festgelegt. Die gegenwärtige und zukünftige Qualität des oberflächennahen Grundwassers wird von Behörden, den NGO und Teilen der Wirtschaftsunternehmen kritisch beurteilt. Bemerkenswerter Weise widersprechen zwei der fünf Wasserversorger dieser Aussage und sehen keine Priorität für die Sanierung des oberen Grundwasserleiters.

16 Institutionen (von 27) sehen als Folge der Druckumkehr zwischen dem mittleren und oberflächennahen Grundwasserleiter die Gefahr, dass Schadstoffe in das mittlere bzw. untere Grundwasserniveau gelangen können. Allerdings sind einem Drittel der Befragten die Zusammenhänge zwischen Förderung von tiefem Grundwasser, der induzierten Druckumkehr und dem damit verbundenen Risiko des Schadstofftransports in das tiefe Grundwasser nicht geläufig, was auf einen verstärkten Informationsbedarf zu dieser Problematik hinweist.

Behörden wünschen größere Wasserschutzgebiete und Wasserschutzzonen, Wasserversorgungs- und Wirtschaftsunternehmen scheinen diesbezüglich eher ambivalent bzw. tentativ die Beibehaltung des Status Quo zu bevorzugen. Die Eigenüberwachung von Anlagen des Gewerbes und der Industrie, in denen wassergefährdende Stoffe verwendet werden, ist aus Sicht der anderen Anspruchsgruppen ungenügend.

- Thema 3: Sektorale Grundwassernutzung

Die meisten Anspruchsgruppen (n=24) ordnen der Grundwassernutzung zur Trinkwasserversorgung oder gewerblichen Nutzungen, die Trinkwasserqualität bedürfen, die höchste Priorität zu. Die Verwendung von oberflächennahem Grundwasser für Landwirtschaft und Erwerbsgartenbau wird in 22 Fällen befürwortet. Die Verwendung von oberflächennahem Grundwasser als Brauchwasser für industrielle Zwecke wird überwiegend positiv bewertet.

- Thema 4: Aktuelle Nutzung unterschiedlicher Grundwasserstockwerke

Vier von fünf Wasserversorgungsunternehmen geben an, Grundwasser auch aus dem mittleren oder unteren Grundwasserleiter zu fördern. Die Förderung erfolgt weitgehend nicht durch Vertiefung alter, sondern mittels neu gebohrter Brunnenanlagen. Die Umstellung der Wasserförderung aus dem oberen in den mittleren Grundwasserleiter datiert mit zwei Ausnahmen aus den Jahren 1964-1977.

- Thema 5: Wechselwirkungen in Siedlungsgebieten

Setzschäden an Gebäuden stellen ein begrenztes Schadensproblem vergangener Jahre dar. Aktuell hingegen erfordern Gebäudevernässungen aufgrund gestiegener Grundwasserstände erhöhte Aufmerksamkeit. Verschmutzungspotentiale im Siedlungsbereich ergeben sich vor allem aus undichten Kanalisationen, deren Kontrolle und eventuelle Sanierung weitgehend bis einhellig befürwortet wird.

- Thema 6: Einflüsse auf Vegetation, Land- und Forstwirtschaft bzw. den Naturschutz

Im Falle landwirtschaftlicher Nutzflächen werden Beschwerden über zunehmende Vernässungsschäden durch den gestiegenen Wasserspiegel des oberen Grundwasserleiters vorgetragen.

Forstwirtschaftliche Folgeschäden der bisherigen Grundwassernutzung sind nicht durchgängig zu konstatieren. Bezogen auf die Angaben der hierfür primär zuständigen Behörden stehen den vier konkreten Bejahungen von Schäden im Forst fünf explizite Verneinungen und zwei fehlende Angaben gegenüber.

Den ursprünglichen Auen- und Sumpflandschaften wird, insbesondere von den Naturschutzverbänden, eine hohe Schutzwürdigkeit zugebilligt, allerdings beschränkt auf ausgewählte Flächen bzw. Naturschutzgebiete. Eine „Renaturierung“ der seit Jahrzehnten vorhandenen Kulturlandschaft und ihrer Vegetation wird nicht angestrebt, auch nicht von den Umwelt- und Naturschutzverbänden. Voraussetzung für diese konsensuale Meinung ist allerdings die Ausweisung entsprechender Schutzräume für die ursprüngliche Vegetation.

### 5.3 Strategische Ansätze zur Verbesserung der Grundwassersituation

Gegenüber der Nutzung anderer Wasserressourcen oder Entnahmereduktionen legen die Umfrageergebnisse die Interpretation nahe, dass eine Verlagerung der Grundwasserförderung vom unteren zum oberen Grundwasserleiter als die adäquate Strategie einer nachhaltigen Grundwassernutzung erscheint. Die Argumente hierfür sind, dass Potenziale für Entnahmereduktionen bereits genutzt und teilweise ausgeschöpft erscheinen; die Nutzung anderer Ressourcen wie eine direkte Entnahme aus Oberflächengewässern (etwa gereinigtes Flusswasser) zur Trinkwasserversorgung einhellig von allen Anspruchsgruppen abgelehnt wird; sowie im Positiven, dass trotz Befürchtungen über die Entwicklung der zukünftigen Qualität des oberen Grundwasserleiters dessen heutige Qualität überwiegend als ausreichend für die vorhandenen Nutzungen angesehen wird.

Zielgruppen	Trinkwasserqualität erforderlich?	Wasserqualität des OGWL ausreichend für Nutzungszwecke?			
		Ja	nein	unbekannt	Gesamt
WVU	ja	4	1	0	<b>5</b>
	nein	0	0	0	<b>0</b>
Behörde	ja	0	2	0	<b>2</b>
	nein	0	0	0	<b>0</b>
Industrie	ja	3	0	1	<b>4</b>
	nein	0	0	1	<b>1</b>
NGO	ja	1	0	1	<b>2</b>
	nein	1	0	0	<b>1</b>

Tabelle 5.2: Verlagerungsmöglichkeiten vom mittleren zum oberen Grundwasserleiter

*Frage II.12: Benötigen Sie für Ihre Zwecke Trinkwasserqualität?*

*Frage II.13 Ist die Qualität des genutzten Grundwassers für Ihre Zwecke ausreichend?*

So bejahen vier der fünf Wasserversorgungsunternehmen und drei von vier Industrieunternehmen die Aussage, dass die benötigte Wasserqualität vom oberen Grundwasserleiter zur Verfügung gestellt werden kann. Dieses Ergebnis indiziert, dass eine bedeutsame Verschiebung der Entnahmemengen vom tieferen Aquifer in das obere Grundwasserstockwerk ohne relevante qualitative Abstriche möglich ist. Dies erlaubt weiterhin die Schlussfolgerung, dass die Verlagerung von Entnahmemengen zu Gunsten höherer Entnahmen aus dem oberen Grundwasserleiter ein praktikables und effizientes Mittel zur Schonung der unteren Grundwasserleiter ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein wirksamer Schutz des oberen Grundwasserleiters vor weiteren Kontaminationen und die Sanierung vorhandener Verschmutzungen.

#### 5.4 Interessens- und Zielkonflikte

Siedlungsentwicklung und Grundwassersituation sind miteinander verbunden durch Fragen zur Bedarfsentwicklung, Verschmutzungspotentialen und Planungskoordination.

Sowohl die Bedarfsentwicklung für Trinkwasser als auch das Versickern von Niederschlagswasser bei quantitativen Engpässen im oberen Grundwasserleiter lassen keinen Zielkonflikt zwischen Siedlungsentwicklung und Grundwassersituation erkennen. Auch werden Kontrolle und eventuelle Sanierung der Kanalisationen weitgehend bis einhellig befürwortet, um Verschmutzungen aus dem Siedlungsbereich vorzubeugen. Ebenso einhellig ist die Aussage, dass entnahmebedingte Absenkungen des Grundwasserspiegels nicht zu Gebäudeschäden durch Setzrisse führen dürfen.

Ein Zielkonflikt zeichnet sich hinsichtlich der Bebauung von Flächen ab, die aufgrund wechselnder Grundwasserstände einer Vernässung ausgesetzt sind. Aus den Antworten kann abgeleitet werden, dass anthropogen verursachte Änderungen des Grundwasserstandes behoben werden sollen. Dies lässt vermuten, dass Vernässungsschäden als Folge von Fehlplanungen (z.B. in Absenkungstrichtern) künftig ein erhebliches Konfliktpotenzial zwischen Hauseigentümern, Planern und Genehmigungsbehörden mobilisieren können.

Umstritten ist die Bewertung von Maßnahmen gegen Vernässungsschäden auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Diese werden in nur 13 Fällen gefordert, gleichzeitig finden sich neun, über alle Anspruchsgruppen variierenden Voten gegen Maßnahmen, die natürliche Grundwasserschwankungen ausgleichen. Die Befragten lassen keine einheitliche Haltung zu der Frage erkennen, ob zur Abwehr periodisch wiederkehrender natürlicher Grundwasserschwankungen Maßnahmen ergriffen werden sollten.

Es zeigt sich, dass zwischen Landwirtschaft und Naturschutz nicht die erwarteten Reibungspunkte bestehen. Naturschutzgebiete zum Erhalt ursprünglicher Vegetationsinseln werden auch von Seiten der Landwirtschaft gutgeheißen. Dies trifft ebenso für die Aussage zur Vermeidung von Vegetationsschäden durch die Grundwasserentnahme wie auch für die vermehrte Nutzung von Oberflächenwasser für Beregnungsanlagen in der Landwirtschaft zu. Auch bei der Forderung zur Behebung von Grundwasserverschmutzungen findet sich ein zustimmendes, kongruentes Meinungsbild.

Insgesamt erweist sich der Naturschutz als ein wenig konflikträchtiger Bereich für eine Interessenabwägung im Sinne einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung. Die Vermeidung von Folgeschäden in der Natur und insbesondere an der Vegetation werden allseits bejaht. Zugleich wird deutlich, dass die Naturschutzverbände ihr Anliegen zum Schutz der ursprünglichen Fluss- und Auenlandschaft in der betreffenden Region klar artikulieren. So fordern diese als einzige Anspruchsgruppe eine teilweise Anhebung des Grundwasserspiegels zur Wiederherstellung bzw. Renaturierung der ursprünglichen Vegetation auf ausgewählten Flächen. Die Umweltverbände wären auch teilweise bereit, hierfür eine Versickerung von gereinigtem Flusswasser zu akzeptieren (künstliche Grundwasseranreicherung), eine Option, die von den anderen Anspruchsgruppen weitgehend abgelehnt wird. Der mögliche Zielkonflikt zwischen Naturschutzgruppen und anderen Anspruchsgruppen relativiert sich allerdings dadurch, dass die Naturschutzverbände die bestehende Kulturlandschaft zu akzeptieren bereit sind, wenn Naturschutzgebiete zum Schutz der ursprünglichen Vegetation vorhanden sind.

In der Beurteilung der Handlungskonsequenzen zur Behebung der Grundwasserbelastungen stimmen Behörden und Wasserversorgungsunternehmen weitgehend überein, nicht jedoch in der Analyse der Ursachen. So verneinen zwei von fünf Wasserversorgern eine hohe Belastung des oberen Grundwasserleiters. Dies erscheint kongruent zu ihrer Interessenlage, aber inkongruent zu den Einschätzungen ihrer Kunden (Industrie), der Behörden und NGO-Verbände. Diese Inkongruenzen finden ihre Fortsetzung bei der Bewertung der Aussagen über den Zeithorizont der Nutzung der tieferen Grundwasserleiter. Die Behörden sehen diese als begrenzt auf den Zeitraum bis 2030 an. Dagegen gehen die Wasserversorgungsunternehmen überwiegend von einer dauerhaften Nutzung dieser Grundwasserleiter aus. Die vorsichtige Stellungnahme eines Vertreters der Wasserversorgungsunternehmen im Workshop kann allerdings so verstanden werden, dass in Zukunft seitens der öffentlichen Trinkwasserversorgung eine Förderung von Wasser aus dem mittleren bzw. tiefen Grundwasserleiter nur noch in Notfällen optional zulässig sein könnte.

Die Wirtschaftsunternehmen betonen ihr Interesse an möglichst reinem Grundwasser und plädieren in diesem Zusammenhang auch für Schutzmaßnahmen bzw. für die Sanierung zur Behebung bestehender Kontaminationen. Diese Bewertung teilt die Wirtschaft mit den Umweltschutzgruppen und den Behörden. Diese zurückhaltend positive Bewertung von volkswirtschaftlichen Interessen setzt sich auch bei den Aussagen zur Begrenzung der Fördermenge auf 20% der durchschnittlichen Erneuerungsrate des Grundwassers sowie ggf. notwendigen besonderen Restriktionen zum Grundwasserschutz in Ballungsregionen fort. Hinzu kommt die Tendenz, Schäden an Vegetation, Landwirtschaft und Gebäuden durch eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung zu verhindern. Diese Position teilt die Wirtschaft mit den Wasserversorgungsunternehmen.

Die Eigeninteressen der Wirtschaft fußen auf dem Streben nach einer langfristigen Sicherung von Quantität und Qualität des Grundwassers als notwendige Ressource für Produktionsprozesse. Bei legitimer Wahrnehmung ihrer Interessen beachtet die Wirtschaft neben betriebswirtschaftlichen durchaus auch volkswirtschaftliche Aspekte.

Es ist auffallend, dass alle Anspruchsgruppen wichtige Informationen zur Bewertung der Grundwassersituation im Rhein-Neckar-Raum zumindest nicht unmittelbar griffbereit verfügbar hatten. Umfassende Kenntnisse über die Bewirtschaftungsgrundlagen des Grundwassers, über die Folgen der Beibehaltung des Status quo bzw. der aufgezeigten Handlungsoptionen und über die Interessenslagen der verschiedenen Anspruchsgruppen sind jedoch eine notwendige Voraussetzung für einen erfolgreichen Dialog und für den Abbau von Zielkonflikten. Hierzu sollte ein effizienter und dialogorientierter Informationsfluss zwischen allen beteiligten Anspruchsgruppen organisiert werden.

## 5.5 Schlussfolgerungen

Das Fazit des Projektbeitrags der TA-Akademie lautet:

Die Voraussetzungen, einen Prozess zur nachhaltigen Grundwassernutzung im Rhein-Neckar-Raum einzuleiten, scheinen gegeben, weil ein solcher vom Grundsatz her von allen Anspruchsgruppen (Stakeholdern) unterstützt wird. Zentrale Grundlagen hierfür sind:

- Es bestehen keine ideologisch unvereinbaren Grundpositionen.
- Der Grundgedanke einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung findet breite Zustimmung.
- Alle Beteiligten erkennen an, dass jeder legitime Interessen verfolgt und diese in den Abwägungsprozess eingebunden werden sollen.
- Die Notwendigkeit gegenseitiger Zugeständnisse im Sinne eines praktikablen und umsetzbaren Kompromisses ist erkannt.

Für einen erfolgreichen Dialog und zum leichteren Abbau von Zielkonflikten ist ein besserer Informationsaustausch über die Folgen der Beibehaltung des Status quo sowie der aufgezeigten Handlungsoptionen erforderlich.

## 6. Szenariobetrachtungen

### 6.1 Vorgehensweise

Aus den Prinzipien zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung und den Umfrageergebnissen wurden verschiedene Szenarien entwickelt, die den denkbaren Spielraum für Maßnahmen in der Grundwasserbewirtschaftung eingrenzen. Dabei wurden grundsätzlich nur prinzipielle Fallbeispiele für Baden-Württemberg betrachtet und dargestellt. Das heisst, dass keine lokale Differenzierung für einzelne Nutzer oder Nutzergruppen vorgenommen wurde, sondern dass jede Maßnahme pauschal alle Nutzer innerhalb einer Gruppe und innerhalb des baden-württembergischen Untersuchungsgebiets gleichermaßen betrafen. Entnahmen in Hessen und Rheinland-Pfalz blieben von den Änderungen auf der Eingabeseite unberührt.

### 6.2 Referenzzustände

Um die verschiedenen Szenarien besser bewerten zu können, wurden diese immer in Beziehung zu zwei Referenzzuständen gesehen.

Der erste Referenzzustand ist der zuvor beschriebene Ist-Zustand (Referenzzustand 1996), der aktuelle Verhältnisse widerspiegelt. Änderungen der Entnahmen in den weiteren Szenarien beziehen sich jeweils auf die Entnahmesituation im Jahr 1996.

Der zweite Referenzzustand beschreibt die sogenannte "Null-Entnahme". Hier werden alle Entnahmen im gesamten Modellgebiet zu Null gesetzt. Dies entspricht der Situation ohne jeglichen Einfluss der Grundwasserbewirtschaftung, ist jedoch keineswegs mit einem Naturzustand gleichzusetzen, da hierzu Änderungen der Oberflächengewässer und der Landnutzung (beispielsweise Versiegelung von Flächen) berücksichtigt werden müssten.

Keiner der beiden Referenzzustände kann und darf als Zielzustand gesehen werden. Ein fiktiver Zielzustand lässt sich nicht ohne weiteres definieren und wäre nur schwer zu rechtfertigen. Stattdessen werden die Veränderungen gegenüber den Referenzzuständen betrachtet.

### 6.3 Hydrologische Randbedingungen

Um den Einfluss der hydrologischen Schwankungen zu berücksichtigen, wurde jedes der Szenarien für jeweils drei verschiedene hydrologische Randbedingungen berechnet. Dies ist notwendig, da bei der stationären Modellberechnung zeitlich veränderlichen Randbedingungen nicht berücksichtigt werden können.

Tabelle 6.1 zeigt die gewählten Datensätze, welche die jeweiligen hydrologischen Randbedingungen für ein Normaljahr, ein Nassjahr und ein Trockenjahr definieren. Die Auswahl folgt den Ausführungen der 3.HGK (Seiten 120 und 125). Die Randströme wurden hier (wie schon bei der instationären Modellrechnung der 3.HGK) nicht variiert.

	Neubildung durch Niederschlag	Pegelstände Rhein und Neckar
Normaljahr	vieljähriges Mittel (1961 - 1993)	vieljähriges Mittel (1983 - 1993)
Trockenjahr	Jahresmittelwerte 1993	Jahresmittelwerte 1993
Nassjahr	Jahresmittelwerte 1983	Jahresmittelwerte 1983

Tabelle 6.1: Hydrologische Randbedingungen

#### 6.4 Prognoseszenarien Entnahmeverlagerung

Hintergrund der Verlagerungsszenarien ist die Problematik der Druckumkehr. Hier sollen die Auswirkungen untersucht werden, die eine Rückverlagerung der Entnahmen aus den tieferen Stockwerken in den OGWL hat. Da insbesondere die öffentlichen Wasserversorger auf hohe Grundwasserqualität angewiesen sind, wurde ihnen Priorität eingeräumt bei der verbleibenden Entnahme aus den tieferen Stockwerken, d.h. sie müssen ihre tieferen Entnahmen nicht im gleichen Maße wie alle anderen Entnehmer in den OGWL verlegen. Dabei wurden folgende Stufen bei den Verlagerungsszenarien berücksichtigt (Tabelle 6.2):

		Öffentliche Wasserversorger	alle anderen Entnehmer
Rückverlagerung in OGWL	Stufe 1	0 %	50 %
	Stufe 2	25 %	90 %
	Stufe 3	50 %	100 %

Tabelle 6.2: Stufen der Verlagerungsszenarien

Für Stufe 1 bedeutet dies zum Beispiel, dass die Öffentlichen Wasserversorger zunächst ihre Entnahmen nicht ändern, alle anderen Entnehmer aber 50% ihrer Entnahmen aus tieferen Stockwerken in den OGWL verlagern. In Stufe 3 sind die Hälfte aller Entnahmen der Öffentlichen Wasserversorger sowie alle anderen Entnahmen vollständig aus den tieferen Stockwerken in den OGWL verlagert worden.

#### 6.5 Prognoseszenarien Entnahmereduktion

Da tendenziell ein Rückgang im Wasserverbrauch zu konstatieren ist (3.HGK, Seite 77; Teilbericht TA-Akademie), ist eine generelle Reduktion der Entnahmen Basis für die Reduktionsszenarien. In der ersten Stufe wurde die Prognosevariante 2010, wie sie in der 3.HGK beschrieben wird, gerechnet. Diese Szenario hat die Besonderheit, dass hier lokal differenzierte Änderungen auch in Rheinland-Pfalz und Hessen gemacht worden sind. Dabei wurde davon ausgegangen, dass in Baden-Württemberg die Entnahmen im Schnitt um 9% im Bereich der öffentlichen Wasserversorger und um 15% im industriellen Bereich zurückgehen. Darauf aufbauend wurden zwei weitere Reduktionsszenarien definiert (diesmal nur für den baden-württembergischen Teil), welche die Reduktion aller Entnahmen gleichermaßen um 20% bzw. 30% vorsieht (Tabelle 6.3).

	Öffentliche Wasserversorger	alle anderen Entnehmer
Prognoseszenario 2010	9 %	15 %
Reduktion Stufe 2	20 %	20 %
Reduktion Stufe 3	30 %	30 %

Tabelle 6.3: Stufen der Reduktionsszenarien

## 7. Ergebnisse der Modell-Szenariorechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Szenariorechnungen kurz vorgestellt. Für eine ausführliche Darstellung der Modellergebnisse sei auf den Abschlussbericht verwiesen.

### 7.1 Vergleich der Referenzzustände

Ein Vergleich der Szenarien "Referenzzustand 1996" und "Null-Entnahme" hinsichtlich der aufgestellten Parameter und Kriterien liefert folgende Erkenntnisse:

#### 7.1.1 Zu- und Abflüsse, Wasserbilanzen

Die Wasserbilanzen zeigen, dass der horizontale Austausch mit Nachbargebieten (Hessen und Rhein im OGWL, Hessen und Rheinland-Pfalz im MGWL) erheblich von den Entnahmeverhältnissen bestimmt wird. Die hydrologischen Randbedingungen haben hier nur im OGWL einen merkbaren Einfluss, der insbesondere auf den Rhein und seine verschiedenen Zonen von Infiltration (südlich von Rheinau, nördlich von Sandhofen) und Exfiltration (Großraum Mannheim/Ludwigshafen) zurückzuführen ist.

#### 7.1.2 Vertikaler Austausch OGWL-MGWL

Beim vertikalen Austausch sind insbesondere die Entnahmen aus dem MGWL zu beachten. Abzüglich des "natürlichen" Austauschs zwischen OGWL und MGWL (entsprechend der "Null-Entnahme") entspricht das vertikale Austauschvolumen im Referenzzustand 1996 den Entnahmen aus dem MGWL, steht also in direkter Beziehung dazu.

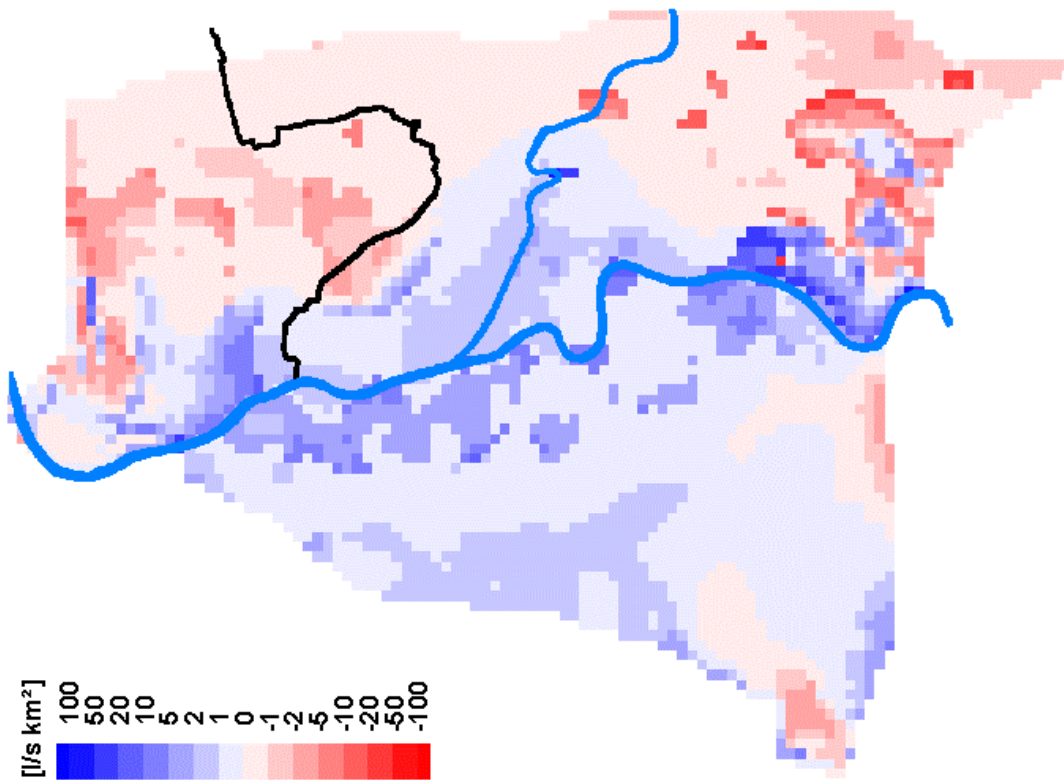
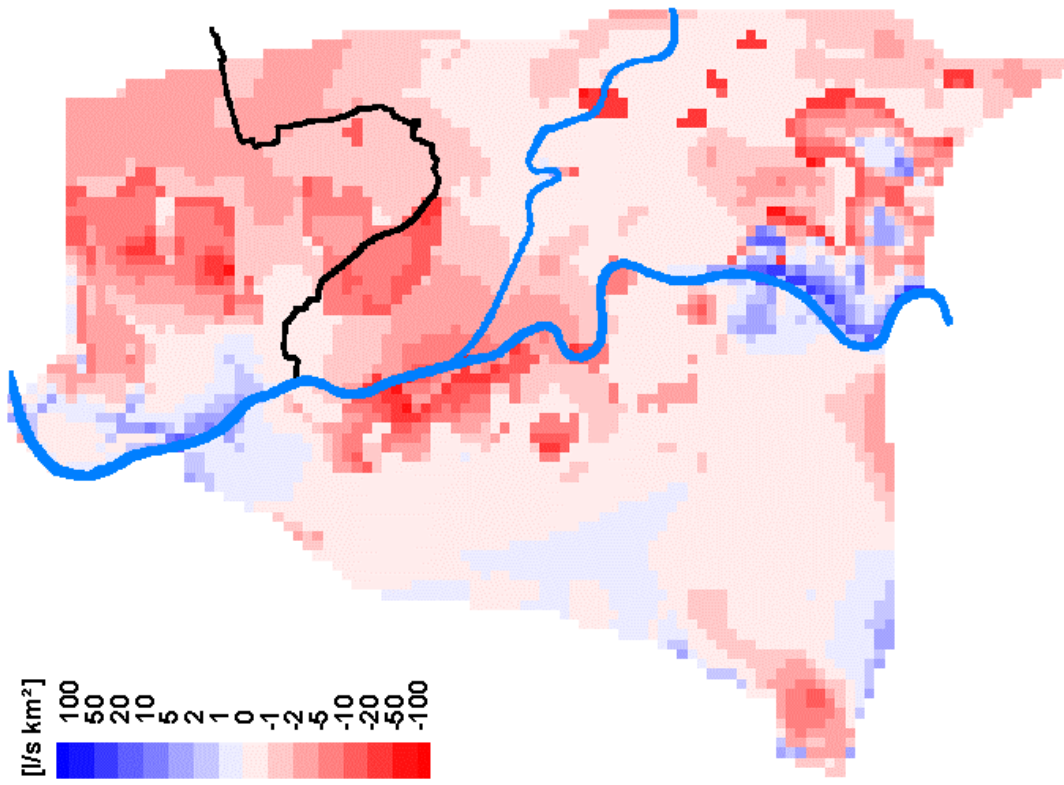
Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die räumliche Verteilung der vertikalen Austauschraten zwischen OGWL und MGWL. Rote Bereiche zeigen ein Absinken von oberflächennahem Grundwasser in den MGWL an, ein Aufstieg von Grundwasser aus dem MGWL in den OGWL ist in den blauen Bereichen zu erkennen. Je satter die Farbgebung, desto höher die Austauschrate.

Vergleicht man nun die Abbildungen 7.1 und 7.2, so kann man den von der Druckumkehr betroffenen Bereich sehr einfach identifizieren. Man erkennt, dass sich insbesondere im Ballungsbereich Mannheim/Ludwigshafen die Richtung des vertikalen Austausches umgekehrt hat (Änderung der Farbe). Dies ist auf die hohen Entnahmen aus tieferen Stockwerken zurückzuführen. Allerdings gibt es auch Bereiche (Osten und Süd-Osten Baden-Württembergs), in denen eine Änderung der Austauschrate fast nicht erkennbar ist. Diese Bereiche stellen den natürlichen Zustrombereich zum MGWL dar (3.HGK, Seite 124).

#### 7.1.3 Mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete

Für die mittleren Verweilzeiten lässt sich grundsätzlich sagen, dass im Einzugsbereich der oberflächennahen Entnahmen die Verweilzeiten in der Regel kürzer werden. Ohne Entnahmen würde das Grundwasser über die Vorfluter, insbesondere Rhein und Neckar, abgeführt werden. Jedoch wird durch Entnahmen das Wasser schon vor Erreichen der Vorflut dem System entzogen. Mit der Absenkung des Grundwasserspiegels im Brunnenbereich wird auch der Gradient der Grundwasserspiegels größer, was zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit beiträgt.

Die Verweilzeiten im Einzugsbereich tieferer Entnahmen werden jedoch größer. Zwar reduzieren sich die Verweilzeiten im MGWL selbst aufgrund der absenkungsbedingten Erhöhung des Gradienten, allerdings kommt der Großteil des aus dem MGWL geförderten Wassers aus dem OGWL, muss also den geringdurchlässigen Zwischenhorizont zwischen OGWL und MGWL passieren.



#### 7.1.4 Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite

Mit dem Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite ist es möglich, die Bereiche zu identifizieren, in denen die Grundwasserstände maßgebend von entnahmebedingten Absenkungen bestimmt werden.

Abbildung 7.3 zeigt die hydrologische Schwankungsbreite (Differenz zwischen maximalem und minimalem Grundwasserstand des Szenarios "Null-Entnahme" für die unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen). Die geringsten Schwankungen treten dabei entlang von Rhein und Neckar auf und entsprechen in etwa den Schwankungen der Pegelstände selbst. Im Nahbereich der Gewässer werden sich, ein hydraulischer Kontakt mit dem Gewässer vorausgesetzt, die Grundwasserstände immer den Pegelständen annähern (Gradient aufgrund einer Potenzialdifferenz).

Die entnahmebedingten Absenkungen für den "Referenzzustand 1996" in einem Normaljahr sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Deutlich ist der große Absenkungstrichter durch die Entnahmen des Wasserwerks Käfertal und die des Waldwasserwerks der PWA (jetzt SCA) zu erkennen. Dafür sind nicht nur Entnahmen im OGWL verantwortlich, denn höhere Entnahmen im MGWL bei gleichzeitig größeren Durchlässigkeiten des oberen Zwischenhorizonts (Trennschicht OGWL und MGWL) tragen auch zur Absenkung im OGWL bei.

Entlang des Rheins sind Absenkungen fast nicht zu erkennen, was gerade im Bereich Mannheim trotz der großen Entnahmemengen hervorzuheben ist. Erklären kann man dies aber durch die erhöhte Infiltration von Oberflächenwasser aus Rhein und Altrhein, die hier für stabile (entsprechend den Flusswasserständen) Grundwasserstände sorgen.

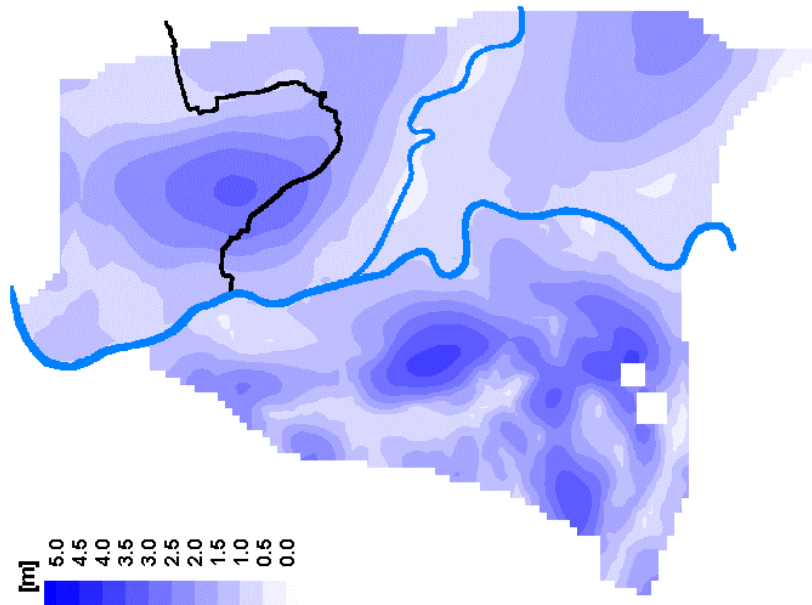
Bildet man nun das Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite, so erhält man die in Abbildung 7.4 dargestellte Karte. Blaue Flächen zeigen die Bereiche auf, in denen die Änderungen des Grundwasserspiegels weitgehend von den hydrologischen Verhältnissen bestimmt werden. Die von entnahmebedingten Absenkungen dominierten Bereiche sind durch rote Flächen gekennzeichnet. Je satter die Farben, desto stärker der jeweilige dominierende Einfluss.

Hier zeigt sich nochmals sehr deutlich der etwa 1 - 4 km breite Streifen entlang des Rheins, in welchem unabhängig von den Entnahmen die hydrologischen Randbedingungen (genauer gesagt die Pegelstände des Rheins) eindeutig dominant sind. Auch die Standorte der großen öffentlichen Wasserversorger und ihr teilweise weitreichender Einflussbereich (Bereiche mit Absenkungen, die größer als die dortige hydrologische Schwankung sind) können problemlos identifiziert werden.

#### 7.1.5 Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich der Landnutzungen

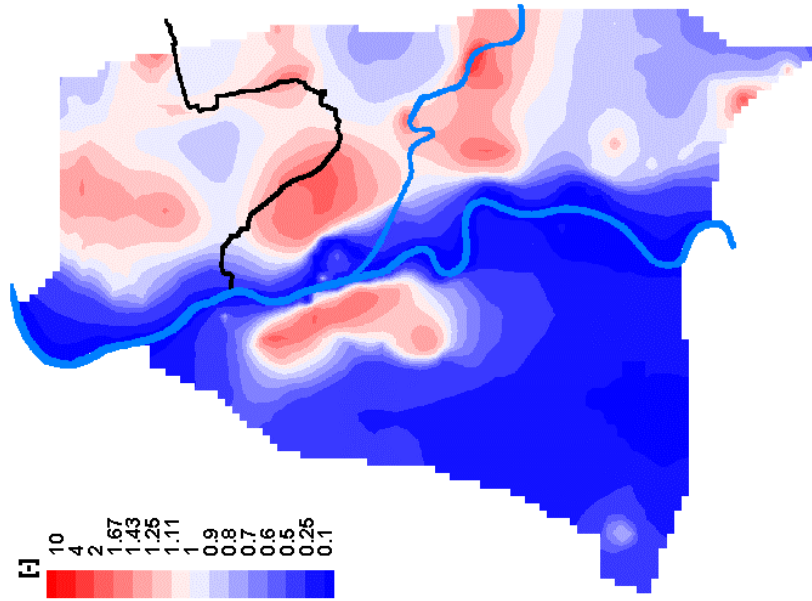
Die räumliche Verteilung der Landnutzung im Rhein-Neckar-Raum ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Jede Landnutzung hat unterschiedliche Anforderungen an einen optimalen Flurabstand. Da im Modell nur mittlere jährliche Verhältnisse dargestellt werden, liefert die Bewertung der Verhältnisse nach diesem Schema nur einen ersten Anhaltswert. Insbesondere Bewertungen, für die absolute maximale und minimale Grundwasserstände von Interesse sind (Vernässungen, Setzungen), können nicht abschließend durchgeführt werden.

Abbildung 7.7 zeigt für den "Referenzzustand 1996" im Normaljahr die Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung anhand des Parameters Flurabstand für Ackerland. Analog wurden Karten für alle anderen Landnutzungen erstellt. Die Farbgebung entspricht den in Kapitel 4.2 aufgestellten Kriterien für einen optimalen Flurabstand. Die schwarzen Flächen sind aus einer Bewertung herausgenommen, da hier der Flurabstand grundsätzlich größer 10 m ist und man von einem grundwasserfernen Standort sprechen muss. Rote Flächen zeigen Bereiche auf, in denen ein Grundwasseranschluss nicht gegeben ist, blaue Flächen deuten auf Vernässungen hin. Optimale Flurabstände sind in den grünen Bereichen zu finden.



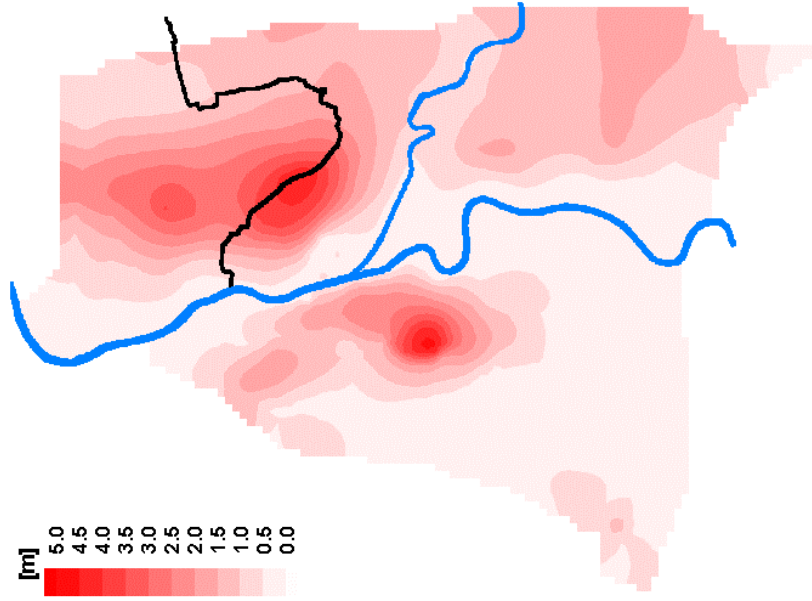
Hydrologische Schwankungsbreite

Abbildung 7.3 Hydrologische Schwankungsbreite



Verhältnis entnahmebedingter Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite [vgl.1996 mean]

Abbildung 7.4: Verhältnis entnahmebedingte Absenkungen zu hydrologischer Schwankungsbreite, Referenzzustand 1996, Normaljahr



Entnahmebedingte Absenkungen [vgl.1996 mean]

Abbildung 7.5: Entnahmebedingte Absenkung, Referenzzustand 1996, Normaljahr

Daneben sind in Abbildung 7.8 die Empfindlichkeiten der Bewertung dargestellt, d.h. wie stark ändert sich die Bewertung unter Berücksichtigung der verschiedenen hydrologischen Randbedingungen. Für die unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen werden die Flurabstände hinsichtlich der aufgestellten Kriterien bewertet. Finden sich dabei ähnliche Bewertungen, so sind die Verhältnisse für die entsprechende Landnutzung als stabil einzuschätzen (angezeigt durch grüne Flächen in Abbildung 7.8). Schwankt die Bewertung jedoch über die gesamte Bewertungsbreite, so ist der Standort entsprechend anfällig auf Grundwasserstandsänderungen (rote Bereiche).

In Abbildung 7.9 ist das schon bekannte Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zu den hydrologischen Schwankungen dargestellt. Damit ist es möglich, die Bereiche zu identifizieren, in denen sich Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Form von entnahmebedingten Absenkungen weitaus stärker auswirken als hydrologisch bedingte Grundwasserstandsschwankungen.

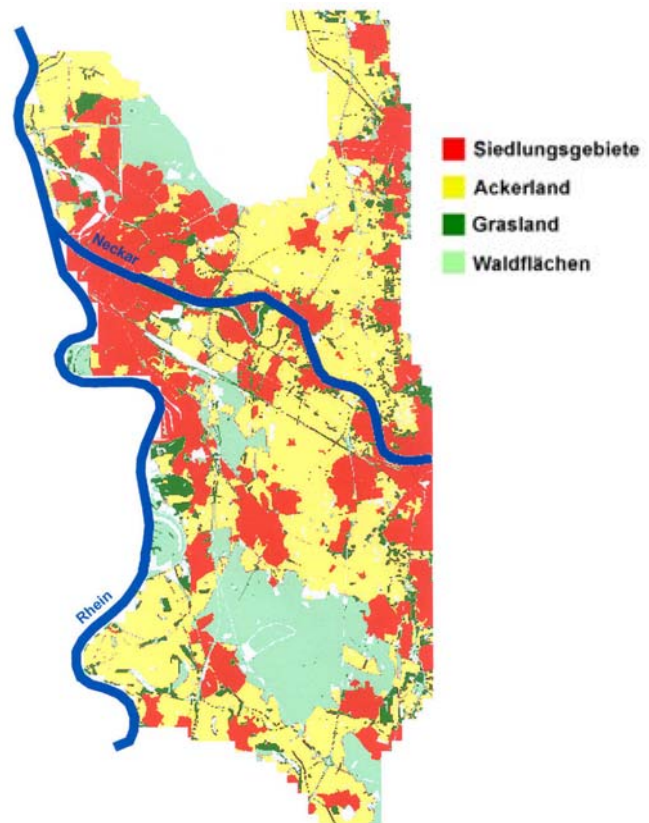


Abbildung 7.6: Landnutzungen im Teilgebiet Baden-Württemberg

Um nun eine Einschätzung der Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich der Auswirkungen auf die Landnutzung treffen zu können, müssen die in Abbildung 7.7 bis 7.9 dargestellten Karten insgesamt betrachtet werden. Man unterscheidet dabei in:

- **grundwasserferne Standorte**  
Diese werden in Abbildung 7.7 durch schwarze Felder angezeigt. Hier spielt die Grundwasserbewirtschaftung keine Rolle, da mit Flurabständen > 10 m der Standort als grundwasserfern zu bezeichnen ist.
- **Standorte in von der Hydrologie dominierten Bereichen**  
Der Einfluss der Entnahmen geht in den hydrologischen Schwankungen unter (tief-blaue Bereiche in Abbildung 7.9). Insbesondere entlang des Rheins kann mit einer Grundwasserbewirtschaftung praktisch keine Änderung erzielt werden.
- **übrige Standorte**  
Eine Einschätzung der Grundwasserbewirtschaftung erfordert hier zum einen die Betrachtung der Bewertung der Flurabstände in Bezug auf die Landnutzung selbst (Abbildung 7.7) sowie die Kenntnis, wie empfindlich die Bewertung auf Schwankungen in den Grundwasserständen reagiert (Abbildung 7.8).

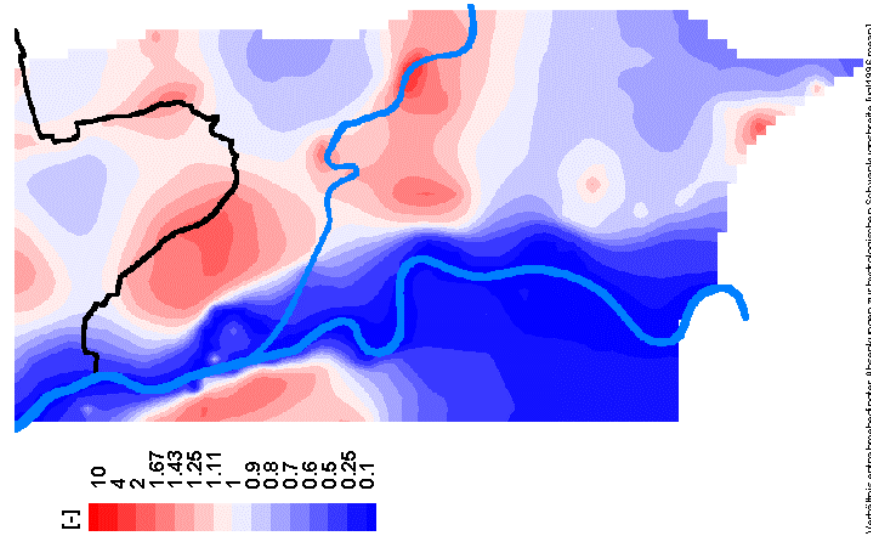


Abbildung 7.9: Verhältnis entnommener Absenkungen zu hydrologischen Schwankungen, Referenzzustand 1996, Normaljahr

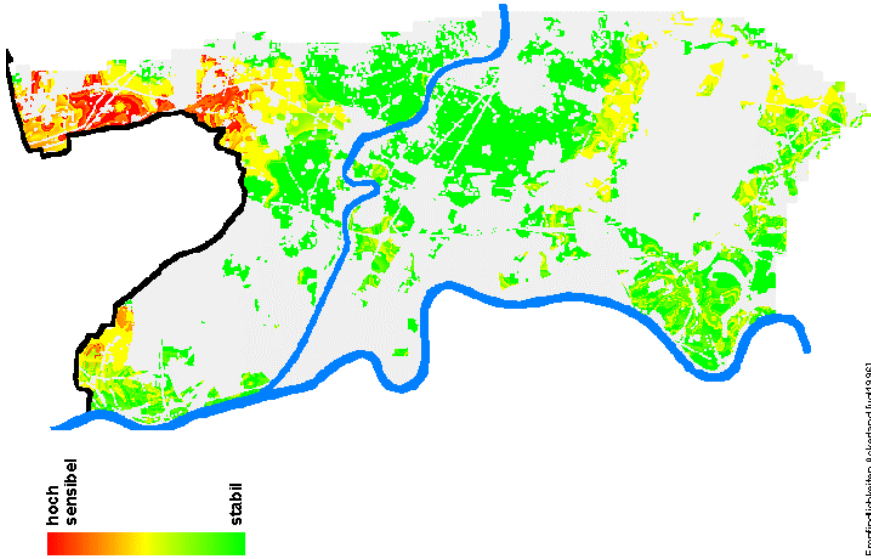


Abbildung 7.8: Empfindlichkeiten der Bewertung Ackerland, Referenzzustand 1996

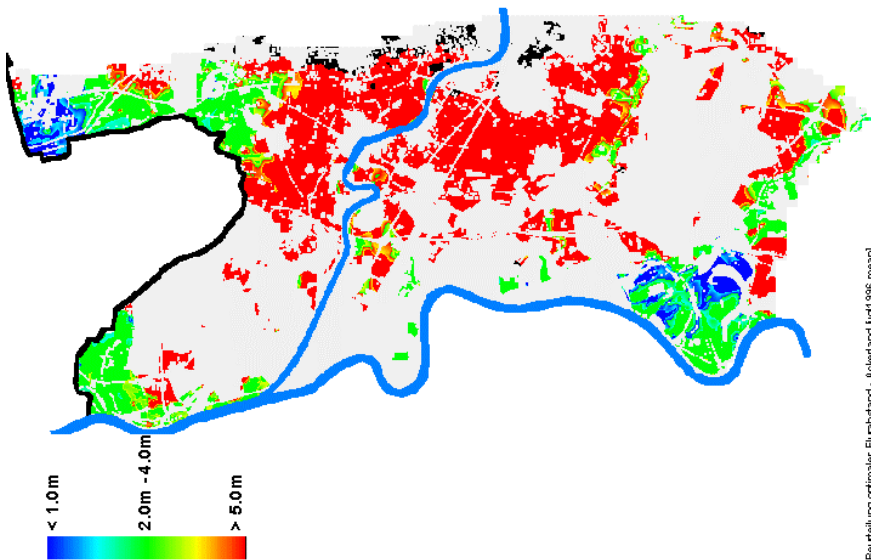


Abbildung 7.7: Bewertung Ackerland, Referenzzustand 1996, Normaljahr

## 7.2 Prognoseszenarien Entnahmeverlagerung

Die Ergebnisse der drei Stufen zur Verlagerung der Entnahmen aus den tieferen Stockwerken in den OGWL werden nun beschrieben. Zur Veranschaulichung der Unterschiede zum "Referenzzustand 1996" wird immer die Stufe 3 herangezogen, da hier die Effekte am stärksten ausgeprägt sind.

Die Wasserbilanzen zeigen deutlich, wie mit sinkender Entnahme aus dem MGWL der Austausch zwischen OGWL und MGWL zurückgeht und in der letzten Stufe fast halbiert werden konnte gegenüber dem "Referenzzustand 1996".

Der deutliche Rückgang des vertikalen Austausches zwischen OGWL und MGWL zeigt sich auch in der räumlichen Verteilung der Austauschraten. Es zeigt sich eine deutliche Reduktion im Bereich des Wasserwerks Käfertal, im Bereich Rheinau - Seckenheim ist sogar die Änderung der Austauschrichtung festzustellen (d.h. Druckumkehr ist hier erfolgt).

Am horizontalen Austausch mit den Nachbargebieten sind nur marginale Änderungen festzustellen. Der horizontale Austausch mit Hessen ändert sich in der Summe nicht, jedoch geht der Gesamtumsatz etwas zurück.

Im Allgemeinen bleiben die mittleren Verweilzeiten unverändert gegenüber dem "Referenzzustand 1996". Durch die höheren Entnahmen verkürzen sich die Zeiten im Nahbereich des Brunnens, allerdings vergrößert sich das Einzugsgebiet. Im MGWL steigen die Verweilzeiten deutlich an, da durch die reduzierte Entnahme der Durchfluss (und damit die Fließgeschwindigkeit) kleiner wird.

Bei Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite sind keine großen Änderungen gegenüber dem Referenzzustand 1996 zu bemerken. In unmittelbarer Umgebung mancher Entnahmen ist deren Einfluss auf die Grundwasserstände aufgrund der größeren Absenkungen größer geworden, allerdings ist der Einfluss lokal stark begrenzt.

Da sich die Grundwasserstände nur sehr lokal etwas ändern, gelten hier im Wesentlichen die Ausführungen zum "Referenzzustand 1996".

## 7.3 Prognoseszenarien Entnahmereduktion

Zu den Szenarien zur Entnahmereduktion sei darauf hingewiesen, dass in der 3.HGK im Fall der Prognosevariante 2010 Entnahmeänderungen im gesamten Modellgebiet entsprechend den Ausführungen vorgenommen wurden. Dagegen blieben bei den in der vorliegenden Studie betrachteten Szenarien mit einer Reduktion von 20% bzw. 30% (Reduktion im Vergleich zum Referenzzustand 1996) die Änderungen auf Entnahmen im Untersuchungsraum Baden-Württemberg beschränkt.

Aus den Wasserbilanzen geht hervor, dass der vertikale Austausch zwischen OGWL und MGWL nur geringfügig zurückgeht. Trotz der großen Gesamtreduktion der Entnahmen wird immer noch mehr Grundwasser aus dem MGWL entnommen als dies bei den Verlagerungsszenarien der Fall war. Wiederum ist der Austausch mit den Nachbarländern von sehr untergeordneter Bedeutung.

Ein klarer Trend zu kürzeren oder längeren Verweilzeiten ist nicht auszumachen. Aufgrund der erhöhten Exfiltration sind die Laufzeiten zu den Oberflächengewässern etwas kürzer, aufgrund der geringeren Entnahmen werden sie in den entsprechenden Einzugsgebieten länger. Die Reduktion im MGWL ist noch nicht groß genug, um eine deutliche Vergrößerung der Verweilzeiten zu bewirken (dies bestätigen die Ergebnisse zum vertikalen Austausch).

Durch die Entnahmereduktion kann der Einfluss entnahmebedingter Absenkungen auf den Grundwasserstand jedoch erheblich reduziert werden. Nur noch im Nahbereich größerer Entnahmen machen sich die Absenkungen bemerkbar. Allerdings wird durch die Gesamtreduktion der Entnahmemengen der Grundwasserspiegel großräumig angehoben. Dadurch ändert bzw. verschiebt sich die Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich der einzelnen Landnutzungen.

## 8. Schlussfolgerungen zu Grundsätzen der Bewertung nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung

### 8.1 Schlussfolgerungen aus den stationären Modellbetrachtungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden großräumige stationäre Modellbetrachtungen durchgeführt, wobei notwendigerweise lokale und zeitliche Variationen unberücksichtigt bleiben. Zu den langfristigen und regionalen Entwicklungen liefert die Rechnung mit einem stationären Modell und Jahresmittelwerten allerdings gute Anhaltswerte für eine erste Bewertung. Diese werden nachfolgend aufgelistet.

#### 8.1.1 Zu- und Abflüsse, Wasserbilanzen

- Es findet ein horizontaler Austausch über Ländergrenzen hinweg statt (Südhessen, MGWL Mannheim/Ludwigshafen), der nicht vernachlässigt werden darf. Eine umfassende Betrachtung der Situation in Baden-Württemberg müsste zusätzlich die Grundwasserbewirtschaftung in den Nachbarländern einbeziehen.
- Bei der Neubildung sind die einzelnen Komponenten (Neubildung durch Niederschlag, Randzustrom, Infiltration aus Oberflächengewässern) differenziert zu betrachten. Insbesondere die Infiltration aus Oberflächengewässern ist in Abhängigkeit von den Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen zu sehen.
- Wechselwirkungen des Grundwassers mit "großen" Oberflächengewässern (deren Jahresabflussmenge sehr viel grösser ist als der gesamter Grundwasserumsatz im Gebiet, hier: Rhein, Neckar) sind als unkritisch zu sehen, da die Auswirkungen auf die Oberflächengewässer bei Änderungen im Austausch vernachlässigbar klein sind.
- Durch die beiden großen Oberflächengewässer Rhein und Neckar wird die Wasserbilanz im Rhein-Neckar-Raum stets ausgeglichen werden. Eine quantitative Übernutzung wird es somit nicht geben können.
- Unterschiedliche hydrologische Randbedingungen (Trockenjahr/Nassjahr) bewirken Schwankungen in den Wasserumsätzen (Austausch mit Nachbargebieten), den Grundwasserständen und insbesondere im Austausch mit Oberflächengewässern.

#### 8.1.2 vertikaler Austausch OGWL-MGWL

- Der Abstrom von Grundwasser aus dem OGWL in den MGWL ist im östlichen Bereich des baden-württembergischen Teilgebiets nicht entnahmebedingt (natürliche Einspeisung am Talrand) und somit auch nicht umzukehren. Der natürliche Aufstieg von Grundwasser im westlichen Bereich (in Rheinnähe) aus dem MGWL wurde durch verstärkte Entnahmen im MGWL unterbunden (Druckumkehr). Durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen kann die Druckumkehr teilweise wieder rückgängig gemacht werden.
- Die Entnahmen im MGWL haben eine größere Auswirkung auf die Potenzialunterschiede und damit auf den Austausch zwischen OGWL und MGWL als Entnahmen im OGWL.
- Die durch Entnahmen im MGWL bewirkte Umkehr der Druckverhältnisse führt zu einer Tiefenverfrachtung von oberflächennahem Grundwasser und damit zu einem erhöhten Risiko von Schadstoffverschleppungen in den bislang unbelasteten MGWL.
- Die Austauschrate zwischen OGWL und MGWL steht in direktem Zusammenhang mit der Entnahmerate aus dem MGWL (Abbildung 8.1).

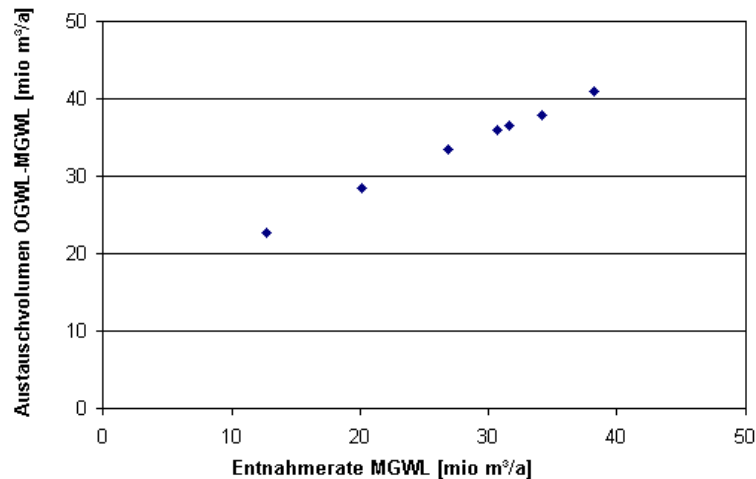


Abbildung 8.1: Zusammenhang Entnahmerate MGWL und Austauschvolumen OGWL-MGWL

### 8.1.3 Mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete

- Im Hinblick auf Grundwasserkontaminationen schafft die Bestimmung von Fließzeiten und Einzugsgebieten von Entnahmen aus tieferen Stockwerken die Voraussetzung für eine erste Abschätzung der Schadstoffverschleppung in den MGWL.
- Mit den Entnahmen im MGWL vergrößern sich die mittleren Verweilzeiten in den entsprechenden Einzugsgebieten aufgrund der Bodenpassage durch den geringdurchlässigen Zwischenhorizont zwischen OGWL und MGWL typischerweise um Jahrzehnte (10 bis 100 Jahre).
- Durch Tiefenverfrachtung in den MGWL werden Schadstoffe aus dem OGWL nicht nur in bislang unbelastetes Grundwasser verschleppt, sondern bleiben aufgrund der höheren Verweilzeiten auch länger im System.

### 8.1.4 Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite

- Die stabilisierende Wirkung "großer" Oberflächengewässer reduziert entnahmebedingte Absenkungen im Uferbereich (Uferfiltrat) und in Flußnähe.

### 8.1.5 Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich der Landnutzungen

- Die Wechselwirkungen zwischen Landnutzungen und Grundwassersystem sind prinzipiell in drei Bereiche zu unterteilen:
  - a) Grundwasserferne Standorte (Flurabstände > 10 m):  
Hier sind keine direkten Wechselwirkungen zu erkennen
  - b) Standorte, wo hydrologische Schwankungen sehr viel größer sind als entnahmebedingte Absenkungen:  
Hier sind Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen von untergeordneter Bedeutung, da sie im Wesentlichen im Gang der natürlichen Schwankungen untergehen.
  - c) Alle anderen Bereiche:  
Hier geben u.a. Sensitivitätskarten für die einzelnen Landnutzungen Aufschluss über den Einfluss der Grundwasserbewirtschaftung.

- Für die verschiedenen Landnutzungsarten (Ackerland, Grünland, Waldstandorte und Siedlungsflächen) wurden jeweils spezifische Sensitivitätskarten erstellt, aus denen räumlich differenziert die Konfliktpotenziale zwischen Grundwasserbewirtschaftung und der jeweiligen Nutzung ersichtlich sind.
- Für landwirtschaftliche Flächen (Ackerland, Grünland) bereiten vor allem die hydrologisch bedingten Grundwasserstandschwankungen Probleme.

## 8.2 Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Erarbeitung von Handlungsoptionen

Zur Beantwortung von lokalen Fragestellungen muss das stationäre Großraummodell entsprechend ergänzt werden durch den Einsatz detaillierter Modelle mit angemessen hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Durch eine instationäre Modellierung und/oder mit Hilfe von langjähriger Zeitreihen verschiedener Messdaten kann unter Berücksichtigung von Niederschlagsereignissen und Hochwasserabläufen durch das Gebiet der Jahresgang der tatsächlichen natürlichen hydrologischen Schwankungen erfasst werden. Zu den im stationären Modell gewonnenen Erkenntnissen sind deshalb die nachfolgenden Anmerkungen zu ergänzen.

### 8.2.1 Zu- und Abflüsse, Wasserbilanzen

- Unterschiedliche hydrologische Randbedingungen (Trockenjahr/Nassjahr) bewirken Schwankungen in den Wasserumsätzen (Austausch mit Nachbarn), den Grundwasserständen und insbesondere im Austausch mit Oberflächengewässern. Die maximal möglichen Schwankungen werden durch die stationäre Modellierung nicht erfasst.
- Vom Großraummodell nicht erfasste Wechselwirkungen des Grundwassers mit "kleinen" Oberflächengewässern (z.B. Quellen, Bäche) können kritisch sein, da die Möglichkeit des zeitweiligen Trockenfallens dieser Gewässer besteht.

### 8.2.2 Vertikaler Austausch OGWL-MGWL (siehe Kapitel 8.1.2)

### 8.2.3 Mittlere Verweilzeiten und Einzugsgebiete

Einzugsgebiete und Verweilzeiten sind vor allem im Hinblick auf Grundwasserkontaminationen und deren mögliche Verschleppung von Interesse. Hierzu ist für das Untersuchungsgebiet anzumerken:

- Der OGWL ist durch Siedlung und Industrie teilweise stark belastet (Altlasten, Altablagerungen, Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen). Hier besteht konkret die Gefahr, dass durch entsprechende tiefere Entnahmen eine Verschleppung in den MGWL bewirkt wird. Um einen guten Zustand des Grundwassers zu erreichen bedarf es einer Sanierung des OGWL.
- Eine Altlastensanierung verursacht zwangsläufig Kosten. Allerdings kann eine Entnahme und Aufbereitung von oberflächennahem Grundwasser zur Wasserversorgung prinzipiell auch eine Sanierung des Grundwassers darstellen.
- Der OGWL ist durch die landwirtschaftliche Nutzung in einigen Bereichen stark belastet (Nitrat, PFSM). Richt- und Grenzwerte werden oft erreicht und teilweise überschritten (3.HGK, Karte 12d). Die Aufbereitung von nitratbelastetem Grundwasser ist mit erheblichen Kosten verbunden. Es ist allerdings zu prüfen, inwieweit nicht aufbereitetes Grundwasser als Brauchwasser eingesetzt werden kann.

- Für eine fundierte Einschätzung einzelner Grundwasserkontaminationen ist der Einsatz geeigneter Stofftransportmodelle erforderlich.

#### 8.2.4 Verhältnis der entnahmebedingten Absenkungen zur hydrologischen Schwankungsbreite

- Die vorliegende Studie rechnet ausschließlich mit Jahresmittelwerten. Für absolute Minimal- und Maximalwerte sind langjährige Meßreihen und/oder instationäre Modellbetrachtungen heranzuziehen.

#### 8.2.5 Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung hinsichtlich der Landnutzungen

- Nach Aussagen der Forstwirtschaft erfordern grundwassernahe Waldstandorte langfristig konstante Grundwasserverhältnisse, so dass hier keine Veränderungen bzw. allenfalls in einem sehr engen Schwankungsbereich hinnehmbar sind. Grundwasserferne Waldstandorte mit großen Flurabständen sind in der Regel unabhängig von wasserwirtschaftlich bedingten Veränderungen.
- Bei landwirtschaftlichen Landnutzungen ist die Problematik der hydrologisch bedingten Vernässungen (also Maximalwerte, nicht Mittelwerte) zu beachten. Eine Bewirtschaftung des Grundwassers zur Kompensation der Vernässungen ist nicht beabsichtigt.
- Bei der Sensitivitätskarte für Siedlungsflächen ist zu berücksichtigen, dass die Erstellung der Karte auf Basis von Jahresmittelwerten erfolgt ist, wobei die tatsächliche Vernässungsgefahr jedoch von den maximalen Grundwasserständen abhängig ist.
- Bei Siedlungsflächen ist neben der Vernässungsgefahr auch die Setzungsproblematik von Bedeutung. Die Setzungsempfindlichkeit ist primär vom Baugrund sowie auch von der maximalen Absenkung des Grundwasserstands abhängig. Eine Bewertung der Setzungsgefahr ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich.
- Bei Naturschutzgebieten (insbesondere Feuchtgebiete) können entnahmebedingte Veränderungen und eine damit einhergehende Änderung der ökologischen Funktion des Naturschutzgebietes - wenn überhaupt - nur stark eingeschränkt akzeptiert werden.

### 8.3 Schlussfolgerungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz

- Die Ziele der Studie werden von allen beteiligten Gruppierungen grundsätzlich unterstützt und die allgemeinen Prinzipien zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung akzeptiert.
- Viele Entnehmer bescheinigen dem oberflächennahen Grundwasser eine für ihre Zwecke ausreichende Qualität, sodass eine Verlagerung zurück in den OGWL durchaus denkbar wäre.
- Die unterschiedlichen Ansprüche der Betroffenen basieren nicht auf ideologisch festgefahrenen Grundsätzen, sondern auf sachlich nachvollziehbaren Anforderungen und Interessen der jeweiligen Stakeholder.
- Grundwasserbewirtschaftung als kurzfristiges Steuerungselement für die natürlich bedingten Schwankungen der Grundwasserstände wird sehr kritisch gesehen.
- Um das Wissen über die komplexen Vorgänge im Grundwasser zu verbessern und um das gegenseitige Verständnis für die individuellen Interessen und Problemlagen zu fördern, wird ein intensiver Informationsaustausch zwischen den Stakeholdern angeregt.
- Ein akuter Handlungsbedarf ist nicht vorhanden, allerdings sind mittelfristig die Anforderungen und Strategien für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung im gegenseitigen Dialog voranzubringen.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Ziel der Studie ist es, die Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten und einen Beurteilungsrahmen aufzuzeigen. Dazu sind zunächst Bewertungskriterien aufgestellt und quantifiziert worden. Mit Hilfe eines stationären numerischen regionalen Modells des Grundwassersystems sind dann, unter Berücksichtigung der Interessen und Ansprüche aller beteiligter Gruppierungen, verschiedene Szenarien berechnet worden. Die Ergebnisse der Szenariorechnungen liefern wichtige Leitlinien und Anhaltspunkte für einen Beurteilungsrahmen zur Umsetzung nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung. Wesentliche Erkenntnisse der Studie sind:

- Eine ausgeglichene Wasserbilanz und ein ausreichendes Grundwasserdargebot ist aufgrund des Austauschs mit Rhein und Neckar immer gewährleistet
- Eine Sanierung des durch verschiedene Kontaminationen belasteten OGWL ist zur Erreichung eines guten Zustandes des Grundwasserkörpers erforderlich
- Durch die verstärkten Entnahmen im MGWL haben sich die ursprünglichen Druckverhältnisse und damit der Wasseraustausch zwischen OGWL und MGWL großräumig umgekehrt. Damit einhergehend ist das Risiko der Verschleppung von oberflächennahen Grundwasserkontaminationen in den bislang unbelasteten MGWL angestiegen
- Durch die Entnahmen im MGWL werden die entsprechenden Verweilzeiten länger, so daß Kontaminationen entsprechend länger nachwirken können.
- Aufgrund der langsamen Reaktionen des Grundwassersystems müssen Maßnahmen rechtzeitig und weit vorausschauend (Jahre und Jahrzehnte) geplant und ergriffen werden
- Ein vorsorgender Grundwasserschutz sollte das gesamte Einzugsgebiet einer Entnahme berücksichtigen. Dies gilt insbesondere auch bei Entnahmen aus tieferen Stockwerken
- Die Verlagerung von Entnahmen aus tieferen Stockwerken in den OGWL trägt effektiver zur Wiederherstellung der natürlichen Druckverhältnisse bei als die gleichmäßige Reduktion der Entnahmen aus MGWL und OGWL
- Bei Entnahmen im OGWL können möglicherweise Synergieeffekte erzielt werden durch die Kopplung von Wasseraufbereitung mit einer Sanierungsmaßnahme.
- Die Empfindlichkeit und die Schwankungsbreite der Grundwasserstände ist gebietsweise stark unterschiedlich
- Je nach Landnutzung (Landwirtschaft, Forst, Siedlung, Naturschutz) ergeben sich unterschiedliche Sensitivitäten im Hinblick auf Veränderungen der Grundwasserbewirtschaftung (Sensitivitätskarten)

Mit dem vorliegenden stationären Grundwassermodell war es möglich, regionale, großräumige Zusammenhänge aufzuzeigen. Da Maßnahmen und deren Auswirkungen aber immer von lokalen Gegebenheiten abhängen, sind für die Beantwortung lokaler Detailfragen stets weiterführende detailliertere Modelluntersuchungen mit entsprechend hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung notwendig.

## 9.2 Ausblick

Für eine umfassende Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten liefert die vorliegende Studie mit ihrer wasserwirtschaftlichen Systembetrachtung einen Orientierungsrahmen und Leitlinien, auf denen spezifische Untersuchungen zur Nachhaltigkeit von Grundwassernutzungen und -bewirtschaftungsmaßnahmen aufbauen können.

Die Sensitivitätskarten können der Raumplanung dazu dienen, wasserwirtschaftliche Aspekte von Anfang an verstärkt in die Planung mit einzubeziehen und regional zu differenzieren in Bereiche mit unterschiedlich ausgeprägten Konfliktpotenzialen zwischen Landnutzung und Grundwasserbewirtschaftung.

Lokale Fragestellungen sind dabei immer ortsspezifisch zu behandeln. Die hier entwickelten Grundsätze und Kriterien sind Leitlinien, die bei den jeweiligen detaillierten Betrachtungen Berücksichtigung finden müssen und entsprechend den örtlichen Verhältnissen anzupassen sind.

Die vorliegende Studie befasste sich prinzipiell nur mit dem baden-württembergischen Teilgebiet. Die dafür aufgestellten Grundprinzipien und der abgesteckte Handlungsrahmen sollten für eine ausgewogene Beurteilung der nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung im gesamten Rhein-Neckar-Raum in Fortsetzung der HGK auch auf die Nachbargebiete ausgeweitet und überprüft werden.

Der eingeschlagene Weg, alle Interessengruppen in die Zieldiskussion einzubinden und damit eine breite Akzeptanz der Prinzipien nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung und der damit verbundenen Maßnahmen und Konsequenzen in der Gesellschaft zu erreichen, sollte konsequent weiterverfolgt werden.

## Literatur

**Kobus, H. & Mödinger, J. (2002): "Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit"; Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2002/15, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart**

**Pfenning, U. & Lehn, H. (2002) "Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit - Auswertung der Umfrage und des Workshop"; Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg**

Amtec Engineering, Inc. (1999): "TECPLOT User's Manual"; Bellevue, Washington

Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des 12. Deutschen Bundestages (1993): "Verantwortung für die Zukunft : Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen"; Bonn

Harbaugh, A.W. (1990): "A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model"; U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392

Harbaugh, A.W. & McDonald, M.G. (1996): "User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model"; U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485

Harbaugh, A.W. & McDonald, M.G. (1996): "Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model"; U.S. Geological Survey Open-File Report 96-486

Harbaugh, A.W.; Banta, E.R.; Hill, M.C.; and McDonald, M.G. (2000): "MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process"; U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92

Kobus, H. (1996): "Water Supply from Groundwater and Ecology: Issues and Controversies"; NATO Advanced Research Workshop, Visegrád, Ungarn

Kobus, H. & Cederwall, K. (1998): "Groundwater - the Policy and Management Perspectives", Stockholm Water Symposium, Schweden

Kobus, H. (1998): "Groundwater Management Problems", Stockholm Water Front, No. 1-2, May 1998

Kobus, H. (1999): "Groundwater Resources Management"; Vorlesungsunterlagen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Kobus, H. & Mödinger, J. (2001): "Bewertung der Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-Neckar-Raum im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit"; Zwischenbericht, Technischer Bericht Nr. 2001/07 HG282, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Leake, S.A. & Lilly, M.R. (1997): "Documentation of a Computer Program (FHB1) for Assignment of Transient Specified-Flow and Specified-Head Boundaries in Applications of the Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model"; U.S. Geological Survey Open-File Report 97-571

Lehn, H. / Steiner, M. / Mohr, H. (1996): Wasser, die elementare Ressource - Leitlinien einer nachhaltigen Nutzung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer

McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. (1988), "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model"; United States Geological Survey

Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg; Der Hessische Minister für Landesentwicklung, Landwirtschaft und Forsten; Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (1980): "Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum - Analyse des Ist-Zustands"; 1.HGK

Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg; Der Hessische Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit; Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz (1987): "Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum - Situation heute, Möglichkeiten und Grenzen künftiger Entwicklung"; 2.HGK

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg; Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (1999): "Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum - Fortschreibung 1983-1998"; 3.HGK

Pollock, D.W. (1994): "User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model"; U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464

Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P. (1992): "Numerical Recipes in Fortran 77 - The Art of Scientific Computing"; Cambridge University Press

United Nations Conference on Environment and Development (1992): "Rio Declaration on Environment and Development", Rio de Janeiro, Brasilien

USGS Homepage (18.11.2002): <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>

World Commission on Environment and Development (1987): "Our Common Future"; Brundtland-Commission, Oxford University Press