



Nur zur Information

# Umbau Knoten Frankfurt (M) - Sportfeld, 2. Ausbaustufe

## Hydrologisches Gutachten

### Anhang I - Dokumentation Grundwassermodell -

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Veranlassung</b>                                      | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Geologische und hydrogeologische Bestandsaufnahme</b> | <b>5</b>  |
| 2.1      | Bearbeitungsgrundlagen                                   | 5         |
| 2.2      | Geologische Entwicklung                                  | 5         |
| 2.3      | Hydrogeologische Schematisierung                         | 6         |
| 2.4      | Grundwasserfließverhältnisse                             | 7         |
| <b>3</b> | <b>Modellaufbau</b>                                      | <b>8</b>  |
| 3.1      | Abgrenzung und Diskretisierung des Modellraumes          | 8         |
| 3.2      | Randbedingungen  | 9         |
| 3.3      | Oberflächengewässer                                      | 9         |
| 3.4      | Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildung           | 11        |
| <b>4</b> | <b>Modellkalibrierung</b>                                | <b>13</b> |
| 4.1      | Grundwasserentnahmen                                     | 13        |
| 4.2      | Variation der Modellparameter                            | 15        |
| 4.3      | Wassermengenbilanz                                       | 17        |
| 4.4      | Vergleichsrechnung Oktober 1996                          | 18        |

## Tabellenverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Klimastationen                            | 11 |
| Tabelle 2: | Grundwasserentnahmen im Untersuchungsraum | 14 |
| Tabelle 3: | Infiltrationen im Untersuchungsraum       | 15 |
| Tabelle 4: | Bilanzgrößen am kalibrierten Modell       | 17 |

## Anlagen

|                |  |  |
|----------------|--|--|
| Anlage 18-I-1: | Übersichtslageplan   |  |
| Anlage 18-I-2: | Aquiferbasis und tektonische Einheiten   |  |
| Anlage 18-I-3: | Verbreitung und Höhenlage der Trennschichten                                     |  |
| Anlage 18-I-4: | Gemessene Grundwasserstände und konstruierte Grundwassergleichen<br>Oktober 1985 |  |
| Anlage 18-I-5: | Mittlere Grundwasserneubildung   |  |
| Anlage 18-I-6: | Kalibrierte $k_F$ -Werte   |  |
| Anlage 18-I-7: | Gemessene Grundwasserstände und berechnete Grundwassergleichen<br>Oktober 1985   |  |
| Anlage 18-I-8: | Gemessene Grundwasserstände und berechnete Grundwassergleichen<br>Oktober 1996   |  |

## 1 Veranlassung

Die DB Netz AG plant die Umgestaltung des Knotens Frankfurt(M)-Sportfeld. Das Gesamtvorhaben ist in drei Ausbaustufen gegliedert. Das vorliegende hydrologische Gutachten behandelt die 2. Ausbaustufe. Die 2. Ausbaustufe umfasst den Bau von zwei zusätzlichen Gleisen zwischen dem Bahnhof Frankfurt-Sportfeld und dem Abzweig Gutleuthof und betrifft den Streckenabschnitt von km ~~30,95~~ 31,24 – km ~~35,23~~ 34,43 der Strecke 3520.

Die zusätzlichen Gleise werden östlich der vorhandenen Strecke für den Personen- und den Güterverkehr gebaut. In Folge des Ausbaus müssen die vorhandenen Eisenbahnüberführungen entsprechend erweitert werden. Für die Überquerung des Mains zum Hauptbahnhof wird eine zusätzliche Brücke gebaut.

Im hydrologischen Gutachten werden u.a. die Auswirkung der hierzu erforderlichen Bauwerke auf das Grundwasser sowie die Auswirkungen des Vorhabens auf die Trinkwassergewinnung mit Hilfe von Grundwassermodellrechnungen bewertet.

Der Detaillierungsgrad des vorhandenen Grundwassermodells wurde für eine adäquate Bearbeitung der Aufgabenstellung deutlich vergrößert und die in den Grundwasserkörper reichenden Bauwerke in das Modell eingearbeitet.

Das den Berechnungen zugrunde liegende Grundwassermodell ist im Folgenden dokumentiert. Das dokumentierte Grundwassermodell wurde mit dem Softwarepaket SPRING ++ der Ingenieurgesellschaft delta h GmbH in Bochum erstellt. SPRING ++ ist ein modular aufgebautes Programmsystem zur Berechnung von Grundwasserströmungs- und Stofftransportvorgängen. Es beruht auf der Methode der Finiten Elemente (FE) und erlaubt sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen. Das beschriebene Grundwassermodell ist echt dreidimensional, was eine exakte Beschreibung des hydrogeologischen Systems, der Grundwasserströmung, der Wechselwirkungen zwischen Vorflutern und Grundwasser und eine tiefendifferenzierte Modellierung von Entnahmen und Infiltration erlaubt.

## 2 Geologische und hydrogeologische Bestandsaufnahme

### 2.1 Bearbeitungsgrundlagen

Für die Rekonstruktion der geologischen Verhältnisse (Aquiferbasis, Verbreitung und Mächtigkeit von grundwasserhydraulisch relevanten Trennschichten) konnte in erster Linie auf umfangreiche Unterlagen über Brunnen- und Messstellenbohrungen der Wasserversorgungsunternehmen zurückgegriffen werden. Zusätzlich wurden entsprechende Unterlagen vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) sowie von Städten und Kommunen zur Verfügung gestellt. Zur Vervollständigung erfolgte eine Auswertung der Bohrdaten aus den Erläuterungen zu den geologischen Karten sowie eine Einsichtnahme und Auswertung von Schichtenverzeichnissen im Archiv des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung (heute HLUG). Im Bereich des Vorhabens wurden darüber hinaus die Baugrunderkundungen berücksichtigt.

### 2.2 Geologische Entwicklung

Das Untersuchungsgebiet umfasst den nördlichen Oberrheingraben. Die westliche Grenze wird vom Rhein als Hauptvorfluter, die östliche Grenze von der Rheingrabenrandverwerfung gebildet, die den Graben von der angrenzenden Hochschollen des Spremlinger Horstes bzw. von dem Frankfurter Horst und der Isenburger Quersenke trennt. Das Untersuchungsgebiet ist im Lageplan der **Anlage 18-I-1** dargestellt.

Die Anlage des Grabens erfolgte ab dem Eozän im Gebiet zwischen Basel und Karlsruhe, von wo aus sie sich nach Norden mit einer Heraushebung den Grabenschultern fortsetzte.

Das Quartär wird vorwiegend aus pleistozänen Sedimenten des Rheins aufgebaut. Nördlich einer Linie Groß-Gerau - Mörfelden verzahnen sich die Aufschüttungen von Rhein und Neckar mit denen des Mains.

Durch tektonische Vertikalbewegungen wurde der nördliche Randbereich des Oberrheingrabens im Pliozän in Hoch- und Tiefschollen zerlegt, die sich anhand des Reliefs der Miozän- bzw. Oligozänoberfläche verfolgen lassen. Im Bereich von Hochschollen stellt das Miozän bzw. Oligozän die Quartärbasis dar, im Bereich von Tiefschollen das Pliozän.

**Anlage 18-I-2** zeigt die tektonischen Einheiten im Untersuchungsgebiet. Der zentrale Grabenbereich wird im Westen im Bereich der Mainspitze von dem Bauscheimer Tertiärschollenverband bzw. der Astheimer Rotliegendescholle und im Osten vom Spremlinger Horst bzw. Frankfurter Horst begrenzt. Der Rotliegend-Tertiär-Sockel im Bereich der Mainspitze wird von pleistozänen Lockergesteinen von rd. 6 m Mächtigkeit überlagert. Der Tertiärsockel des Bauscheimer Tertiärschollenverbandes ist in sich in Teilschollen zerlegt, so dass bei Bohrungen im Bereich der Mainspitze sowohl dem Oligozän zuzuordnende Cyrenenmergel als auch dem Miozän zuzuordnende Corbicula-Mergel als Basis des Pleistozäns aufgeschlossen wurden. In beiden Fäl-

len handelt es sich um tonige Sedimente, die als Basis des quartären Grundwasserleiters fungieren.

Östlich der Mainspitze hat eine von Rüsselsheim nach Gräfenhausen in Nordwest-Südost-Richtung verlaufende Störung ihren Ausgangspunkt. Diese Störung stößt im Bereich von Darmstadt an die östliche Grabenrandverwerfung. An dieser Störung findet ein Versatz der Grundwasserleiterbasis um bis zu 50 m statt. Unmittelbar nördlich von Walldorf verläuft die E-W-streichende Walldorfer Störung, die einen Bereich geringmächtiger Grundwasserleiter von der Kelsterbacher Tiefscholle trennt. An der Walldorfer Störung findet ein Versatz in der Mächtigkeit des Grundwasserleiters um rd. 50 m im Bereich Buchschlag und bis zu rd. 170 m im Bereich von Raunheim statt. Im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle stellen die pliozänen und pleistozänen Sedimente den Grundwasserleiter dar. Gegenüber den pleistozänen Terrassensanden und -kiesen sind die pliozänen Sedimente geringer durchlässig. Es wechseln sich mäßig bis gut wasserwegsame Sande mit Kieslagen und tonig-schluffigen Zwischenlagen ab.

## 2.3 Hydrogeologische Schematisierung

Aufgrund der lithologischen Ausbildung in Form von relativ undurchlässigen Tonen und Mergeln wurde im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle das Top des Miozän als Aquiferbasis angenommen und im Bereich der Mainspitze das Top des Tertiär (Oligozän oder Miozän) bzw. des Rotliegenden. Hier stellen die vorwiegend fluviatil abgelagerten Sande und Kiese des Pliozäns und Pleistozäns den Grundwasserleiter dar. Im südlich an die Kelsterbacher Tiefscholle angrenzenden Bereich beschränkt eine großflächig anstehende geringdurchlässige Trennschicht die Aquifermächtigkeit.

Im zentralen Grabenbereich bei Königstädten beträgt die Mächtigkeit der pleistozänen und pliozänen Sedimente ca. 450 m. Da nur rd. ein Viertel dieser Mächtigkeit wasserwirtschaftlich durch Tiefbrunnen genutzt wird, wurde die modelltechnische Aquifermächtigkeit deutlich geringer angesetzt. Als Basis wurden hier tiefere Abschnitte des Pleistozäns gewählt, in denen oft feinkörnige Trennschichten eingelagert sind. Das WW Hof-Schönau (siehe Anlage 18-I-1) liegt unmittelbar östlich der Grabenrandverwerfung bei Bauschheim im zentralen Grabenbereich, der hier die tiefste Absenkung erfahren hat. Mehrere Brunnen des Wasserwerks Hof-Schönau, die eine Teufe von rd. 100 m besitzen, binden in einen Tonhorizont in einer Höhenlage zwischen 2 und 11 müNN ein, der hier als Aquiferbasis angesetzt wurde. Im nördlichen Modellgebiet finden an den Schollengrenzen Versätze der Aquiferbasis im 10er-Meter-Bereich statt. Im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle steigt die Aquiferbasis von Westen nach Osten auf rd. 120 müNN an. Die Höhengleichen der Aquiferbasis sind ebenfalls in Anlage 18-I-2 dargestellt.

Bei der Interpolation der Aquiferbasis wurden auch die Erkundungsbohrungen entlang der geplanten Bahntrasse der NBS Rhein/Main – Rhein/Neckar berücksichtigt.

Für die Grundwasserhydraulik sind feinkörnige Schichten, die bei einer größer flächigen Verbreitung zu einer Stockwerkstrennung führen können, von Bedeutung. Im Untersuchungsgebiet wird ein Trennhorizonte (Schluffe, Tone, teilweise schluffig-tonige Feinsande) im Modell be-

rücksichtigt, der sich über größere Entfernungen korrelieren lässt. Dessen Verbreitung in der **Anlage 18-I-3** dargestellt. Zusätzlich wurde ein lokaler Trennhorizont im Bereich der Maßnahme EÜ Golfstraße in das Grundwassermodell implementiert.

Im Bereich des Frankfurter Flughafens ist eine bis zu 1,5 m mächtige Trennschicht in einer Höhenlage von 75 - 90 müNN ausgebildet. Diese setzt sich nach Osten im Bereich der Brunnen des WW Walldorf fort und nimmt weiter nach Osten hin im Bereich westlich von Sprendlingen bis auf eine Mächtigkeit von ca. 20 m zu. Im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle liegt die Oberkante diese Trennschicht auf einer Höhenlage zwischen 80 und 110 müNN.

## 2.4 Grundwasserfließverhältnisse

**Anlage 18-I-4** zeigt den konstruierten Grundwassergleichenplan vom Oktober 1985 (mittlere Verhältnisse). In dem Gleichenplan sind die zugrundeliegenden Messwerte dokumentiert.

Nördlich von Rüsselsheim stellt der Main den Vorfluter dar, südlich davon fließt das Grundwasser dem Rhein zu. Das Grundwassergefälle am östlichen Modellrand, der mit der Rheingrabenrandverwerfung identisch ist, ist deutlich steiler als im Westen. Die großräumigen Strömungsverhältnisse werden kleinräumig von Grundwasserentnahmen überprägt. Absenktrichter durch Grundwasserentnahmen, die sich durch ein Rückspringen der Gleichen darstellen, sind bei den Wasserwerken Schwanheim und Goldstein, Neu-Isenburg, Langen, des Wasserwerkes Mörfelden, beim Gruppenwasserwerk Gerauer Land und beim Wasserwerk Hof Schönau zu verzeichnen. Deutlich ist auch die dränierende Wirkung des Gundbaches an den stark zurückweichenden Grundwassergleichen zu erkennen. Umgekehrt bewirken Grundwasseranreicherungsmaßnahmen (oberstromig WW Hinkelstein und im Bereich Neu-Isenburg) ein Vorspringen der Grundwassergleichen.

### 3 Modellaufbau

#### 3.1 Abgrenzung und Diskretisierung des Modellraumes

Die nördliche Modellgrenze des Grundwassermodells bildet der Main. Im Westen begrenzt der Rhein hydraulisch das Modellgebiet. Die südliche Modellgrenze führt etwa auf der Höhe von Groß-Gerau entlang einer Stromlinie. Im Osten bildet die Randverwerfung am Übergang des Rheingrabens zum Festgestein eine hydrogeologisch vorgegebene Grenze des Modellraums.

Die horizontale Diskretisierung des Modellgebietes erfolgte durch ca. 7.500 Knoten und 9.900 Drei- oder Viereckselemente. Die Netzgeometrie orientiert sich primär an den Gewässern, am Modellrand (Rhein, Main) und an den im Modellgebiet implementierten Brunnen und Infiltrationsorganen sowie der Lage der Neubaustrecke. In Bereichen, deren kleinräumiges Strömungsverhalten einen geringen Einfluss auf die nachfolgenden Untersuchungen hat, wurde eine gröbere Auflösung gewählt (Elementkantenlänge 500 m). Die Zustrombereiche aller Brunnen wurden logarithmisch verfeinert, so können die hier vorhandenen starken Gradienten und somit großen Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen der Grundwasserströmung gut nachbildet werden. Um den extremen vertikalen Versatz der Aquifersohle, die insbesondere an der Abbruchkante des Bauschheimer Tertiärschollenverbandes in den zentralen Oberrheingraben zu ausgeprägt dreidimensionalen Strömungen führt, adäquat abbilden zu können, wurde das Finite-Elemente-Netz in diesen Bereichen auch horizontal verfeinert. Feiner diskretisiert wurde auch entlang der Vorfluter sowie im Bereich der in das Grundwasser reichenden Maßnahmen des beantragten Ausbauvorhabens.

Die vertikale Diskretisierung erfolgt durch 8 Knotenebenen mit entsprechend 7 eingeschlossenen Elementschichten. Die im Zuge der hydrogeologischen Systemanalyse rekonstruierten hydraulisch wirksamen Trennschichten wurden in das echt dreidimensionale Finite-Elemente-Modell entsprechend ihrer Verbreitung und Mächtigkeit übernommen.

Die oberste Knotenebene entspricht der Geländeoberfläche. Zur Ermittlung der Geländehöhen wurde das digitale Geländemodell des Landesvermessungsamtes überarbeitet und anschließend auf das FE-Netz interpoliert. Die zweite, in Höhe des Grundwasserspiegels befindliche Knotenebene ist aus numerischen Gründen eingefügt. Außerdem sorgt sie für eine genügend feine vertikale Diskretisierung zur Simulation der Ex- und Infiltrationsvorgänge im Bereich der Vorfluter und Infiltrationsanlagen. Die vierte Knotenebene ist durch die Oberkante der oberflächennahen Trennhorizonte gelegt, sie ist aber auch in Bereichen ohne Trennhorizonte ausgebildet. Die sechste Knotenebene bildet im Bereich zwischen zentralem Grabenbereich und der Kelsterbacher Tiefscholle die Aquiferbasis. Im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle wurde diese Knotenebene auf die Grenze Pliozän/Pleistozän gelegt. Die Unterkante der Trennhorizonte (Knotenebene fünf) ist nur dort als Knotenebene modelliert, wo der jeweilige Horizont, der Bohrprofilauswertung entsprechend, ausgebildet ist. Die achte Knotenschicht bildet die Aquiferbasis ab. Die Entnahmehäuser und Infiltrationsorgane wurden entsprechend der vertikalen Lage ihrer Filterstrecken den einzelnen Knotenebenen zugewiesen.

### 3.2 Randbedingungen

Den westlichen Modellrand bildet der Rhein, den nordwestlichen und nördlichen Modellrand der Main. Diese Modellränder werden als Dirichlet-Randbedingungen modelliert. Die im stationären Modell angesetzte Wasserspiegellage wurde durch lineare Interpolation zwischen den Pegeln Nierstein-Oppenheim und Mainz für den Rhein sowie Frankfurt/Osthafen und Raunheim für den Main ermittelt. Dazu ist anzumerken, dass die Mainwasserstände durch die Richtwasserstände an den Schleusen vorgegeben sind und aufgrund dieser Steuerung nur minimale Schwankungsbreiten aufweisen.

Im Osten bildet die Randverwerfung des Rheingrabens als Übergang vom Porengrundwasserleiter zum Festgestein eine natürliche Begrenzung des Modellraumes. Im Bereich des Spremlinger und des Frankfurter Horstes wird dieser Modellrand als Neumann-Randbedingung modelliert, d.h. der Zufluss in den Modellraum wird abgeschätzt und im Zuge der Modellkalibrierung ggf. korrigiert. Lediglich im Bereich der Neu-Isenburger Quersenke wird auch der östliche Modellrand als Dirichlet-Randbedingung modelliert, da langjährige Grundwasserstandsmessungen zeigen, dass der Grundwasserstand hier relativ unabhängig vom Strömungsgeschehen westlich des Modellrandes ist. Die südliche Modellgrenze liegt etwa auf der Höhe von Groß-Gerau. Ihre Lage wurde auf Basis der Grundwassergleichenpläne als Stromlinie ausgebildet. Das so eingegrenzte Modellgebiet erfasst eine Fläche von ca. 344 km<sup>2</sup>, die Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 9 bis 18 km, die Ost-West-Ausdehnung 11 bis 28 km.

### 3.3 Oberflächengewässer

Das Untersuchungsgebiet wird nach Westen und Norden durch die Flüsse Rhein und Main begrenzt. Im nördlichen Hessischen Ried liegt der Wasserspiegel des Rheins in der Regel unter dem Grundwasserspiegel, so dass der Rhein dem Grundwasser als Vorfluter dient. Das Abflussregime des Main unterliegt aufgrund der drei Stauhaltungen Kostheim, Eddersheim und Griesheim und den dort vorgegebenen Sollstauhöhen nur sehr geringen Schwankungen, wie die Pegeldata der Mainpegel Raunheim und Frankfurt/Main Osthafen belegen. Die Wechselwirkung des Mains mit dem Grundwasser ist stark durch die Staustufen geprägt, so dass im Oberwasser in der Regel Mainwasser in den Grundwasserleiter infiltriert, während im Unterwasser eine dränierende Wirkung vorliegt.

Die das Untersuchungsgebiet entwässernden kleineren Vorfluter gehören (außer dem in den Main mündenden Kelsterbach) alle zum Schwarzbachsystem. Sie durchfließen den Modellraum von Ost nach West, münden alle in den Schwarzbach, der wiederum in den Rhein. Nördlichstes Gewässer des Schwarzbachsystems ist der Hengstbach, unterhalb der Air-Base wird das Gewässer Gundbach, nach Einmündung des Geräthsbaches Schwarzbach genannt. Der Geräthsbach wird östlich von Mörfelden Hundsraben genannt. Von Nord nach Süd folgen als Hauptvorfluter Hegbach und Apfelbach. In den Hegbach münden Kircherseckgraben und Tränkebach. In den Apfelbach münden Hahnwiesenbach und Silz.

Von nahezu allen Gewässerabschnitten lagen Längsschnitte vom Wasserverband Schwarzbachgebiet-Ried (1988) vor. Diese relativ gute Datenbasis ist vor allem zur Beurteilung der Wechselwirkung mit dem Grundwasser von Bedeutung. Pegeldata lagen für die Pegel Aumühle (Mühlbach), Nauheim (Schwarzbach) und Mönchsbruch (Geräthsbach und Gundbach) vor. Im Bereich des Hengstbaches muss durchgängig von einer Infiltration in den Grundwasserleiter ausgegangen werden. Es ist belegt, dass das Gewässer in trockenen Jahren zwischen Spremlingen und Zeppelinheim zeitweise vollständig versickert, die versickernde Wassermenge wurde mit 10 l/s abgeschätzt (Hess. Landesamt für Bodenforschung 1980). Der nach der Verrohrung im Bereich der ehemaligen Air-Base am Flughafen Frankfurt anschließende Gundbach sowie der anschließende Schwarzbach dienen dem Grundwasser als Vorfluter. Auch die südlich von Bauschheim z.T. in ehemaligen Altarmschlingen des Rheins und des Mains verlaufenden Gräben haben entwässernde Funktion und führen Grundwasser an den Schwarzbach ab, bevor dieser in den Ginsheimer Altrhein mündet.

Am Hegbach wechseln in- und exfiltrierende Gewässerabschnitte einander ab während der Apfelbach überwiegend infiltriert. Der bei Kelsterbach in den Main mündende Kelsterbach dient dem am Terrassenrand austretenden Grundwasser als Vorfluter. Alle übrigen Gewässer spielen bei mittleren hydrologischen Verhältnissen eine untergeordnete Rolle (RP Darmstadt 1993). Zu bemerken ist allerdings, dass kleine, normalerweise unbedeutende Gräben (in Bereichen niedriger Flurabstände) im Falle hoher Grundwasserstände eine obere Begrenzung der Grundwasseroberfläche bewirken, indem sie durch ihre dränierende Wirkung ein weiteres Ansteigen verhindern.

Die Oberflächengewässer wurden über Leakage-Randbedingungen nachgebildet. Die Austauschvorgänge zwischen Vorfluter und Grundwasser werden dabei proportional zur Potentialdifferenz zwischen Oberflächengewässer und Grundwasseroberfläche mit einem Leakage-Koeffizienten als Proportionalitätsfaktor errechnet. Die Infiltrationsrate kann auf einen Maximalwert begrenzt werden. Ebenso ist eine Beschränkung der durch das Gewässer abgeführten Grundwassermenge möglich. Sowohl der Leakage-Koeffizient als auch die maximale In- und Exfiltrationsleistung der Gewässer sind Parameter, deren Wert im Zuge der Kalibrierung des Modells so abgeschätzt werden muss, das sich plausible In- und Exfiltrationsleistungen ergeben.

Im Untersuchungsgebiet befinden sich einige, größtenteils durch Kiesabbau entstandene Seen. Aufgrund ihrer geringen Ausdehnung in Grundwasserfließrichtung beeinflussen diese Seen die Grundwasseroberfläche nur geringfügig. Eine Ausnahme bilden die Langener Baggerseen, die aufgrund ihrer Größe und Lage gemeinsam mit der Deponie Dreieich lokal einen relativ starken Einfluss auf die Grundwasserströmung haben.

## 3.4 Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildung

Insbesondere bei großräumigen Modellen ist die dem Grundwasserleiter durch Versickerung von Niederschlag zufließende Wassermenge (Grundwasserneubildung) eine entscheidende Bilanzgröße. Die Grundwasserneubildung wird auf der obersten Modellknotenebene als flächenhafter Randzufluss (Neumann-Randbedingung) vorgegeben.

Für das stationäre Modell war die Ermittlung einer mittleren Grundwasserneubildungsrate erforderlich. Die Daten des Niederschlags und der Verdunstung (Haude) standen von den in Tabelle 1 aufgelisteten Klimastationen zur Verfügung.

Tabelle 1: Klimastationen

|   | Station                    |                |
|---|----------------------------|----------------|
| 1 | Frankfurt/Flughafen        | (ab 68)        |
| 2 | Groß-Gerau – Wallerstädten | (ab 83)        |
| 3 | Darmstadt                  | (ab 83)        |
| 4 | Pfungstadt                 | (ab 68 bis 83) |

Die Klassifizierung der Bodennutzung wurde mit Hilfe eines GIS auf Basis von Satellitenaufnahmen (Landsat TM) vorgenommen. Daraus wurden die Nutzungsklassen Acker, Grünland, Wald, Siedlung und Wasser abgeleitet.

Die Ermittlung der Bodennutzung mit Hilfe von Satellitenbildern erfolgt durch die Zuweisung bestimmter Spektralbereiche zu den einzelnen Nutzungen. Eine Grünfläche ist auf diese Weise nicht von einem grünen Weizen- oder Maisfeld zu unterscheiden. Betrachtet man die Nutzungskartierung des Untersuchungsraumes, fällt der hohe Grünlandanteil im Bereich westlich der Linie Groß-Gerau Rüsselsheim auf, es handelt sich hierbei überwiegend um Ackerflächen mit grünem Fruchtbestand. Die als Grünland deklarierte Nutzung in diesem Bereich wurde mit Angaben der Gemeindestatistik und mit anderen Nutzungskartierungen abgeglichen (RP Darmstadt 1999) und größtenteils als Ackerfläche in die Berechnung der Grundwasserneubildungsraten einbezogen.

Die Bodenklassifizierung erfolgte auf Basis der Bodenkarte (1:50.000) des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung (heute HLUG). Mit Hilfe eines GIS wurden die Bodenklassen und Nutzungsklassen verschnitten und daraus die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFK-We) berechnet.

Mit diesen Ausgangsdaten konnten die Grundwasserneubildungsraten nach WESSOLEK berechnet werden. Die verwendeten Regressionskoeffizienten wurden im Rahmen einer Untersuchung für den Umlandverband Frankfurt speziell an die klimatischen Bedingungen im Großraum Frankfurt (dem der Modellraum zugehört) angepasst (Wessolek 1992). Folgende Gleichungen wurden verwendet:

## Ackernutzung

$$G_{\text{neu}} = (1,03 \times N_W + 0,86 \times N_S - 128,2 \times \log \text{nFK-We} - 0,05 \text{ ETP} - 92,9)$$

## Grünland

$$G_{\text{neu}} = (1,024 \times N_W + 0,914 \times N_S - 118,3 \times \log \text{nFK-We} - 0,151 \text{ ETP} - 122,75)$$

## Wald

$$G_{\text{neu}} = (0,907 \times N_W + 0,925 \times N_S - 129,8 \times \log \text{nFK-We} - 0,13 \text{ ETP} - 118,92)$$

## Siedlung

$$G_{\text{neu}} = 1/3 \text{ „Grünland“}$$

## Offene Wasserflächen

$$G_{\text{neu}} = N_W + N_S - 1,5 \text{ ETP}$$

|                    |  |
|--------------------|--|
| $G_{\text{neu}}$ : | mittlere Grundwasserneubildungsrate [mm/m <sup>2</sup> /a] |
| $N_W$ :            | mittlerer Winterniederschlag der Jahre 1969 –1983 [mm]     |
| $N_S$ :            | mittlerer Sommerniederschlag der Jahre 1969 –1983 [mm]     |
| nFK-We:            | nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum[mm]        |
| ETP:               | potentielle Jahresverdunstung nach Haude [mm]              |

Insgesamt werden auf der rund 344 km<sup>2</sup> großen Fläche durch Niederschlagsversickerung 33,6 Mio. m<sup>3</sup>/a Grundwasser neugebildet. Dies entspricht einer mittleren Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet von etwa 98 mm/a.

Im Süden und Südwesten des Untersuchungsgebietes befinden sich berechnete Ackerflächen. Die auf diesen Flächen angesetzten Berechnungsmengen orientieren sich an Angaben der HLfU. Es wird davon ausgegangen, dass 25% der Berechnungsmenge wieder in tiefere Bodenschichten perkolieren und um diesen Betrag die Grundwasserneubildung erhöht wird (RP Darmstadt 1999). Das Berechnungswasser wird im Modellraum ausschließlich in vielen dezentralen Brunnen entnommen. Unter berechneten Ackerflächen wurden zur adäquaten Abbildung diese flächenhaft wirkenden Entnahmen zur Beregnung, verringert um 25 % infolge der durch die Beregnung erhöhten Grundwasserneubildung, von der Grundwasserneubildung aus Niederschlag abgezogen. Die zugrundegelegten Beregnungsmengen orientieren sich an den Angaben der HLfU zur Beregnungsintensität in den einzelnen Gemeinden und schwanken zwischen 60 mm (niedrige Intensität) und 100 mm (hohe Intensität) bei mittleren klimatischen Verhältnissen (RP Darmstadt 1999). Die durch Niederschlag neugebildete Grundwassermenge wird durch die diffusen Entnahmen zu Beregnungszwecken um ca. 3,7 Mio. m<sup>3</sup>/a verringert. Die unter diesen Annahmen berechneten mittleren Grundwasserneubildungsraten im Modellgebiet sind **Anlage 18-I-5** dargestellt.

## 4 Modellkalibrierung

Die Kalibrierung des stationären Modells muss auf Basis eines Strömungszustandes erfolgen, der die mittlere hydrologische Verhältnisse repräsentiert, da nur dann die Zuflüsse, Entnahmen, Wasserstände des Grundwassers und der Oberflächengewässer im gesamten Modellgebiet stabile mittlere Werte aufweisen und im Gleichgewicht zueinander stehen. Neben den natürlichen Randbedingungen ist auch die Frage der Stationarität bezüglich der Entnahmen und Infiltrationen zu beachten.

Zur Modellkalibrierung wurde die Stichtagsablesung vom Oktober 1985 herangezogen. Der auf Basis dieser Grundwasserstände konstruierte Grundwassergleichenplan ist in Anlage 18-I-4 dargestellt. Großräumig entspricht dieser Zeitraum klimatisch und auch bezüglich der Fördermengen mittleren Verhältnissen nach der Trockenperiode 1970-77 und den Nassjahren 1982-83.

### 4.1 Grundwasserentnahmen

Der Untersuchungsraum zählt zu den stark beanspruchten Grundwassergewinnungsgebieten Deutschlands. Die Gesamtfördermenge von über 35 Mio. m<sup>3</sup>/a (1996) liegt in Höhe der jährlichen mittleren Grundwasserneubildung. Zu bemerken sind der genereller Abwärtstrend des Trinkwasserverbrauchs sowie die zunehmend greifenden Wassersparmaßnahmen der Industrie: 1996 wurden ca. 6 Mio. m<sup>3</sup> weniger Wasser im Untersuchungsraum gefördert als 1985.

Die relevanten Grundwasserentnahmen im Untersuchungsraum sind für die Jahre 1985 (Kalibrierzeitraum des Grundwassermodells) und 1996 in nachfolgender Tabelle 2 dokumentiert.

Tabelle 2: Grundwasserentnahmen im Untersuchungsraum

| Entnehmer                     | Förderung 1985<br>[m <sup>3</sup> /a] | Förderung 1996<br>[m <sup>3</sup> /a] | Differenz<br>[m <sup>3</sup> /a] |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| WW Dreieich                   | 1.532.490                             | 1.814.617                             | 282.127                          |
| WW Gerauer L.                 | 2.150.000                             | 3.786.000                             | 1.636.000                        |
| WW Hof Schönau                | 7.856.450                             | 7.105.680                             | -750.770                         |
| WW Langen                     | 878.890                               | 995.360                               | 116.470                          |
| WW Mörfelden                  | 1.020.571                             | 893.731                               | -126.840                         |
| WW Neu-Isenburg*              | 2.718.541                             | 2.440.770                             | -277.771                         |
| WW Walldorf                   | 873.665                               | 1.011.956                             | 138.291                          |
| WW Zeppelinheim               | 154.000                               | 141.828                               | -12.172                          |
| PW Griesheim                  | 1.063.000                             | 582.160                               | -480.840                         |
| PW Goldstein                  | 233.090                               | 738.640                               | 505.550                          |
| PW Hinkelstein                | 2.533.570                             | 3.201.470                             | 667.900                          |
| PW Oberforsthaus              | 914.700                               | 8.600                                 | -906.100                         |
| PW Schwanheim                 | 4.013.556                             | 3.725.362                             | -288.194                         |
| US Air-Base                   | 625.000                               | 150.000                               | -475.000                         |
| Firma ENKA (Kelsterbach)      | 4.168.850                             | 2.436.305                             | -1.732.545                       |
| Firma Höchst (Mönchhof)       | 6.941.010                             | 3.672.645                             | -3.268.365                       |
| Firma Höchst (Werksgelände)** | 553.000                               | 395.000                               | -158.000                         |
| Firma Opel (Rüsselsheim)**    | 2.095.760                             | 1.408.275                             | -687.485                         |
| Firma Tikona (Kelsterbach)    | 926.000                               | 817.000                               | -109.000                         |
| Sonstige                      | 226.226                               | 115.711                               | -110.515                         |
| <b>Summe</b>                  | <b>41.478.369</b>                     | <b>35.441.110</b>                     | <b>-6.037.259</b>                |

\* davon Sanierungsentnahmen die wieder infiltriert werden 1985: 569.301 m<sup>3</sup>/a; 1996: 691.110 m<sup>3</sup>/a (s.u.)

\*\* Sanierungsentnahmen

Tabelle 3 dokumentiert die infiltrierten Wassermengen dieser Jahre.

Die Mainova AG (heute Hessenwasser GmbH & Co. KG) mit ihren 5 Pumpwerken Griesheim, Goldstein, Hinkelstein, Oberforsthaus und Schwanheim bestreitet mit einer Jahresförderung von über 8 Mio. m<sup>3</sup>/a (1996) den Löwenanteil der Förderung im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle. Mit über 7 Mio. m<sup>3</sup> Jahresförderung sind die Stadtwerke Mainz mit dem Wasserwerk Hof-Schönau der zweitgrößte Entnehmer. Im Wasserwerk Langen-West wurden 1996 knapp 1 Mio.

m<sup>3</sup> gefördert. Die größten industriellen Grundwasserentnahmen im Untersuchungsraum erfolgen durch die Firmen Enka und Hoechst.

Infiltriert wurden 1985 ca. 6,9 Mio. m<sup>3</sup> und 1996 ca. 7,8 Mio. m<sup>3</sup>. Dabei handelt es sich größtenteils um aufbereitetes Mainwasser, welches die Mainova AG (heute Hessenwasser GmbH & Co. KG) in ihren Versickerungsorganen infiltriert. Neben Stützinfiltrationen zur Sicherung der Wasserversorgung erfolgen Schutzinfiltrationen zur Abwehr von Kontaminationen aus dem Bereich der Rhein Main Flughafen AG im Oberstrom des Pumpwerkes Hinkelstein. Daneben infiltriert die Stadt Neu-Isenburg relativ große Regenwassermengen aus der Trennkanalisation, die Stadtwerke Neu-Isenburg reinfiltrieren die aufbereitete Entnahme ihrer zur Sanierung von CKW-Schäden eingesetzten Sanierungsbrunnen.

Tabelle 3: Infiltrationen im Untersuchungsraum

| Entnehmer                  | Infiltration 1985<br>[m <sup>3</sup> /a] | Infiltration 1996<br>[m <sup>3</sup> /a] | Differenz<br>[m <sup>3</sup> /a] |
|----------------------------|--|--|----------------------------------|
| PW Goldstein               | 1.401.440                                | 154.303                                  | -1.247.137                       |
| PW Hinkelstein *           | 3.346.710                                | 5.818.399                                | 2.471.689                        |
| PW Oberforsthaus           | 791.523                                  | 247.520                                  | -544.003                         |
| Stadtwerke Neu-Isenburg**  | 569.301                                  | 691.110                                  | 121.809                          |
| Firma Opel (Rüsselsheim)** | 0  | 199.064                                  | 199.064                          |
| Stadt Neuisenburg ***      | ca. 850.000                              | ca. 850.000                              | 0                                |
| <b>Summe</b>               | <b>6.958.974</b>                         | <b>7.960396</b>                          | <b>802.358</b>                   |

\* etwa zur Hälfte Schutzinfiltration

\*\* Infiltration von aufbereiteten Sanierungsentnahmen

\*\*\* Infiltration von Regenwasser aus Trennkanalisation

(in Abhängigkeit von Einzugsgebietsgröße und Versiegelungsgrad überschlägig ermitteltes Regenwasserzulußvolumen)

## 4.2 Variation der Modellparameter

Im Rahmen der Kalibrierung erfolgt eine Variation der Modellparameter, bis eine hinreichende Übereinstimmung der gemessenen mit den errechneten Grundwasserständen erreicht ist.

Die zugrundegelegte Aquifergeometrie und die flächenhaften Grundwasserneubildungsraten wurden als gesichert betrachtet und im Rahmen der Kalibrierung nicht variiert. Kalibriergrößen sind bei stationärer Rechnung Leakage-Koeffizienten, maximale In- und Exfiltrationsraten,  $k_f$ -Werte und der Zustrom über die Modellränder (Neumann-Randbedingung).

Die Koeffizienten wurden im Modell variiert, bis plausible In- und Exfiltrationsraten erreicht waren. Die Gesamtinfiltrationsmenge über die Leakage-Knoten im Modellgebiet beträgt ca. 5,3 Mio. m<sup>3</sup>/a, exfiltriert werden ca. 6,5 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Für die pleistozänen Schichtenfolgen im östlichen Modellgebiet werden Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen  $1 \cdot 10^{-4}$  und  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s angegeben. Gegenüber den pleistozänen Terrassensanden und -kiesen sind die unteren pliozänen Sedimente im allgemeinen geringer durchlässig. Für den plio-pleistozänen Grundwasserleiter, der in weiten Teilen der Kelsterbacher Tiefscholle eine hydraulische Einheit bildet, werden Durchlässigkeitsbeiwerte von  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s bis  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s angegeben (Hessisches Landesamt für Bodenforschung 1969, 1974, 1980, Schmitt 1992).

Die in der Literatur zu findenden Durchlässigkeitsbeiwerte für den zentralen Bereich des Rheingrabens liegen zwischen  $1 \cdot 10^{-4}$  und  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Im Nahbereich des Wasserwerkes Hof Schönau wurden bei älteren Pumpversuchen Werte von etwa  $2,2 \cdot 10^{-4}$  m/s gemessen. Bei neueren Pumpversuchen ergaben sich Werte von  $6 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Die Trennhorizonte wurden einheitlich mit einem  $k_f$ -Wert von  $1 \cdot 10^{-6}$  bis  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s belegt. Bereichsweise wurde ein verhältnismäßig hoher  $k_f$ -Wert angesetzt, da die Stockwerkstrennung abschwächende, sicherlich vorhandene Fenster in den Horizonten nicht gesondert modelliert wurden. Nördlich von Langen im Bereich der Kelsterbacher Tiefscholle standen dagegen bei der Modellierung sehr detaillierte Angaben zur Ausbreitung und Mächtigkeit des Tonhorizontes sowie Messwerte einiger nur im unteren Aquifer verfilterter Messstellen zur Verfügung.

Zur Durchlässigkeit des Aquifers lagen die Ergebnisse verschiedener Pumpversuche vor, auf Grundlage dieser Daten wurden obere und untere Grenzwerte der Durchlässigkeiten festgelegt. Innerhalb der so vorgegebenen Grenzen wurden dann  $k_f$ -Werte im Zuge der Modellkalibrierung solange im Bereich plausibler Grenzen variiert, bis eine gute Übereinstimmung gerechneter und gemessener Grundwasserstände erreicht war. Die hierbei ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind in **Anlage 18-I-6** dokumentiert. In **Anlage 18-I-7** sind die mit dem kalibrierten Modell berechneten Grundwassergleichen den Messwerten vom Oktober 1985 gegenübergestellt.

## 4.3 Wassermengenbilanz

Im kalibrierten Modell liegt der Zustrom über den östlichen Modellrand bei insgesamt etwa 2,7 Mio. m<sup>3</sup>/a. Davon fließen ca. 1,3 Mio. m<sup>3</sup>/a über den Festpotentialrand im Bereich der Isenburger Quersenke in den Modellraum.

Der Main speist den Aquifer mit ca. 3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a. Sehr große Mengen werden im Bereich der großen mainnahen Entnahmen (ca. 7 Mio. m<sup>3</sup>/a) im Wasserwerk Mönchshof der Höchst AG infiltriert, während im Norden der Main weiterhin die Vorflut für das Grundwasser darstellt. In den Rhein und seine Altarme exfiltrieren ca. 1,7 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Die bis auf den Kelsterbach in den Rhein entwässernden Fließgewässer exfiltrieren netto ca. 1,2 Mio. m<sup>3</sup>/a bei einer Infiltrationsleistung von ca. 5,3 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer Exfiltrationsleistung von ca. 6,5 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Diffuse Grundwasserentnahmen zu Berechnungszwecken sind mit ca. 3,7 Mio. m<sup>3</sup>/a berücksichtigt. Die mittlere flächenhafte Grundwasserneubildung durch Niederschlag beträgt ca. 33,6 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die Brunnenentnahmen belaufen sich auf ca. 40,1 Mio. m<sup>3</sup>/a (die Differenz zur Angabe in Tabelle 2 ist auf die im Modell geringer angesetzte Förderung zur Grundwassersanierung der Opel AG zurückzuführen, die erst 1984 anlieft und sich 1985 noch nicht stationär ausgebildet hatte). Infiltriert werden ca. 6,9 Mio. m<sup>3</sup>/a, wobei der größte Anteil (ca. 5,5 Mio. m<sup>3</sup>/a) von der FAG eingeleitet wird. Eine Übersicht der Bilanzglieder zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Bilanzgrößen am kalibrierten Modell

| Bilanzgröße                  | Zu<br>[Mio. m <sup>3</sup> /a] | Ab<br>[Mio. m <sup>3</sup> /a] |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Gewässerinfiltration         | 5,33                           |                                |
| Gewässerexfiltration         |                                | 6,49                           |
| Rhein                        |                                | 1,67                           |
| Main                         | 3,38                           |                                |
| Zufluss aus Festgestein      | 1,39                           |                                |
| Zufluss aus Isenburger Senke | 1,31                           |                                |
| Grundwasserneubildung        | 33,63                          |                                |
| Bewässerungsentnahmen        |                                | 3,67                           |
| Entnahmen                    |                                | 40,12                          |
| Infiltrationen               | 6,94                           |                                |
|                              | <b>51,98</b>                   | <b>51,95</b>                   |

## 4.4 Vergleichsrechnung Oktober 1996

Das kalibrierte Modell wurde an den Entnahmebedingungen 1996 verifiziert. Die für Oktober 1996 berechneten Grundwassergleichen und die zugehörigen Messwerte zeigt **Anlage 18-I-8**. Vergleicht man zunächst die gemessenen Grundwasserstände Oktober 1985 (Anlage 18-I-7) und Oktober 1996 (Anlage 18-I-8) miteinander, fällt die starke Übereinstimmung sowohl in der Strömungscharakteristik als auch in der absoluten Höhe der Grundwasserstände auf. Dies ist auf den starken Einfluss der Vorfluter auf die Grundwassersituation im Untersuchungsgebiet zurückzuführen. Diese puffern durch In- und Exfiltration sowohl hydrologisch bedingte als auch durch Veränderung der Entnahmeraten der Wasserwerke bedingte Grundwasserstandsänderungen ab.

Die deutlichen, in Tabelle 2 dokumentierten Veränderungen in der Förderung führen zu einem veränderten Systemzustand. Dennoch kann die Strömungscharakteristik sehr gut nachgebildet werden. Das für mittlere hydrologische und klimatische Bedingungen (Oktober 1985) kalibrierte Modell gibt auch die Situation im Oktober 1996 gut wieder, der als ein aktueller Bezugszustand für mittlere Grundwasserverhältnisse angesehen werden kann. Dies belegt, dass die Modellparameter plausibel gewählt sind und das Modell damit prognosefähig ist.

Brandt·Gerdes·Sitzmann  
Umweltplanung GmbH

Darmstadt, den ~~11.04.2012~~ 15.07.2016

  
Dr.-Ing. M. Kämpf

  
Dipl.-Geodkol. A. Spinola

