
**Grundwassermanagementsysteme - die Kopplung von
Datenbanken, Geographischen Informationssystemen (GIS)
und Grundwassermodellen am regionalen Beispiel des
Gewinnungsgebietes Queckborn/Hessen**

**Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
der Justus-Liebig-Universität Gießen
(Fachbereich 08 - Fachrichtung Geowissenschaften)**

Teil 1

Vorgelegt von
Christoph Möbus
aus Reiskirchen/Hessen

Gießen, Mai 2007

1. Berichterstatter: Prof. Dr. K. Knoblich

2. Berichterstatter: Prof. Dr. L. King

Dekan: Prof. Dr. P. R. Schreiner

Tag der mündlichen Prüfung: 13.07.2007

Vorwort

Herrn Prof. Dr. Klaus Knoblich möchte ich für die Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit danken. Er war immer interessiert am Fortgang der Arbeit und stellte mir im Institut für Angewandte Geologie in Gießen einen Arbeitsplatz zur Verfügung.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Lorenz King für die spontane Übernahme des Zweitgutachtens und die Möglichkeit, im Rahmen seines Seminars die Ergebnisse dieser Arbeit präsentieren zu dürfen.

Weiterhin danke ich Herrn Dr. Bernd Hanauer und dem Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH für die Anregung zur Durchführung dieser Arbeit, für die Unterstützung, die anregenden Diskussionen und die zur Verfügungsstellung der benötigten Hard- und Software.

Bedanken möchte ich mich auch bei dem DWD, dem HLUG, dem Hessischen Landesvermessungsamt, der OVAG AG, der SWG AG und allen weiteren Betreibern von Grundwassergewinnungsanlagen im Untersuchungsgebiet für die Übermittlung bzw. zur Verfügungsstellung vorhandener bzw. angefragter Daten.

Meiner Familie danke ich für ihre stetige Unterstützung.

Kurzfassung

Diese Arbeit stellt eine wissenschaftliche Analyse der Möglichkeiten der digitalen Informations- und Datenverarbeitung in der Hydrogeologie mit Hilfe von Datenbanken, Geographischen Informationssystemen (GIS) und Grundwassermodellen dar und ist eine Grundlage für zukünftige Bearbeitungen in diesem Gebiet. Dabei wird vor allem die Kopplung von Datenbanken, Geographischen Informationssystemen (GIS) und Grundwassermodellen zu Grundwassermanagementsystemen untersucht.

Ausgehend von der Tatsache, dass Trinkwasser auf der ganzen Welt das wichtigste Grundnahrungsmittel darstellt und in der Bundesrepublik Deutschland ca. 70 % des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen werden, kommt dem Trinkwasserschutz und im Speziellen dem Grundwasserschutz (weltweit) eine ganz besondere Bedeutung zu. Das Grundwasser ist in besonderem Maße schützenswert, da hier zumeist eine notwendige Regeneration im Falle einer Kontamination deutlich langsamer fortschreitet und auch eine mögliche Speicherentleerung durch Überförderung nur sehr langsam wieder rückgängig gemacht werden kann. Daher wurden schon früh Methoden entwickelt, die dem Zwecke dienen, den Schutz und die dauerhafte Verfügbarkeit von Trinkwasser zu verbessern.

Anhand des regionalen Beispiels für das Gewinnungsgebiet Queckborn wird die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems gezeigt. Hier zeigt sich mit der Entwicklung des hydrogeologischen Modells, dass die Bearbeitung des gesamten westlichen Vogelsberges notwendig ist, um ein hydrogeologisch plausibles Modellgebiet zu erreichen. Auf der Grundlage des hydrogeologischen Modells werden alle relevanten Daten gesammelt und aufbereitet. Mit Hilfe der Kopplung des Geographischen Informationssystems und der Grundwasserdatenbank werden die Grundlagen für die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells für das Untersuchungsgebiet gebildet. Hierbei erfolgt eine optimale Kombination, Abstimmung und Anpassung der Teilkomponenten des Grundwassermanagementsystems mit Hilfe der Abfragesprache SQL sowie der Programmiersprachen AVENUE und Visual Basic for Applications.

Abstract

This study is a scientific analysis of the options of the digital information- and data processing in the hydrogeology with the help of data bases, geographic information systems and ground water models and is meant to be a base for future work on this theme. Here the coupling of data bases, geographic information systems and ground water models to (so called) ground water management systems is especially studied.

On the basis that drinking water is the main staple food in the world and about 70 % of the drinking water in Germany comes out of ground water, protecting drinking water and ground water is very important. Especially ground water needs to be protected, because of normally long lasting regeneration processes in cases of pollution and emptying of ground water storage caused by over-usage. Therefore, methods to protect drinking water from pollution and over-usage have a long history.

On the example of the regional pumping region Queckborn the construction of a ground water management system is shown. The development of the hydrogeologic model shows that the whole western region of the Vogelsberg has to be considered to get a hydrogeologically consistent model region. On the basis of the hydrogeologic model all relevant data are collected and analysed. Coupling of geographic information system and groundwater data base creates the necessary information for the numerical groundwater model which is built. An optimal combination, coordination and adjustment of the components of the ground water management system is reached by the database query language SQL and the programming languages AVENUE and Visual Basic for Applications.

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|--|--------------|
| Vorwort _____ | I |
| Kurzfassung _____ | II |
| Abstract _____ | III |
| Inhaltsverzeichnis _____ | IV |
| Abbildungsverzeichnis _____ | VI |
| Tabellenverzeichnis _____ | VI |
| Abkürzungen und Konventionen _____ | VII |
| 1 Einleitung _____ | 1 |
| 1.1 Einführung in die Problemstellung _____ | 1 |
| 1.2 Darstellung der Untersuchungen und Untersuchungsmethoden _____ | 3 |
| 2 Die Entwicklung der Grundwasserüberwachung – Entwicklung von Grundwassermanagementsystemen _____ | 5 |
| 3 Aufbau von Grundwassermanagementsystemen _____ | 10 |
| 3.1 Vorbemerkungen _____ | 10 |
| 3.2 Datenbanksysteme - Grundwasserdatenbank _____ | 11 |
| 3.2.1 Entwicklung von Datenbanksystemen _____ | 13 |
| 3.2.2 Aufbau des relationalen Datenmodells _____ | 16 |
| 3.2.3 Grundlagen von Datenbank-Systemen _____ | 21 |
| 3.2.4 Datenbank - Software _____ | 22 |
| 3.3 Geographische Informationssysteme (GIS) _____ | 24 |
| 3.3.1 Entwicklung der Geographischen Informationssysteme _____ | 25 |
| 3.3.2 Grundlagen der Geographischen Informationssysteme (GIS) _____ | 26 |
| 3.3.3 Geographische Informationssystem (GIS) – Software _____ | 28 |
| 3.4 Grundwassermodelle _____ | 32 |
| 3.4.1 Einleitung _____ | 32 |
| 3.4.2 Grundlagen von numerischen Grundwassermodellen _____ | 32 |
| 3.4.3 Entwicklung von numerischen Grundwassermodellen _____ | 35 |
| 3.4.4 Anwendung von numerischen Grundwassermodellen _____ | 44 |
| 3.4.5 Grundwassermodellierungs – Software _____ | 46 |
| 4 Kopplung von Grundwasserdatenbanken, GIS und Grundwassermodellen zu Grundwassermanagementsystemen _____ | 51 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5 | Queckborn/Hessen – Ein regionales Beispiel für die Entwicklung eines gekoppelten Grundwassermanagementsystems | 55 |
| 5.1 | Einführung | 55 |
| 5.2 | Grundwasserdatenbank | 57 |
| 5.2.1 | Datenmodell der Grundwasserdatenbank | 58 |
| 5.2.2 | Programmierung der Benutzeroberfläche | 59 |
| 5.2.3 | Programmierung von Funktionen zur Datenein- und -ausgabe, Auswertung und Analyse | 60 |
| 5.2.4 | Erstellung von Berichtsformularen, automatisierte Berichtserstellung | 60 |
| 5.3 | Geographisches Informationssystem (GIS) | 61 |
| 5.3.1 | Datenerfassung und Datenaufbereitung | 62 |
| 5.3.2 | Datenverschneidung und Berechnungen | 64 |
| 5.3.3 | Programmierung | 65 |
| 5.3.4 | Anpassung der Benutzeroberfläche | 66 |
| 5.3.5 | Entwurf von Layout-Dokumenten | 67 |
| 5.4 | Grundwassermodell | 67 |
| 5.4.1 | Hydrogeologische Übersicht | 68 |
| 5.4.1.1 | Datengrundlage | 68 |
| 5.4.1.2 | Geographischer Überblick | 68 |
| 5.4.1.3 | Klima und Grundwasserneubildung | 69 |
| 5.4.1.4 | Geologischer Überblick | 72 |
| 5.4.1.5 | Grundwasserleiter, Grundwasserhemmer | 80 |
| 5.4.1.6 | Grundwasserpotentialschwankungen, Grundwasserströmungsverhältnisse | 81 |
| 5.4.2 | Konzeption für das numerische Grundwassermodell | 89 |
| 5.4.2.1 | Darstellung der wesentlichen geohydraulischen Prozesse | 89 |
| 5.4.2.2 | Modellkonzeption | 90 |
| 5.4.2.3 | Strategie der Modellkalibrierung, Darstellung der Modellergebnisse | 91 |
| 5.4.3 | Modellaufbau und Modellgebiet | 93 |
| 5.4.3.1 | Vertikaler Modellaufbau, Schichtgeometrien | 93 |
| 5.4.3.2 | Modellränder und äußere Randbedingungen | 95 |
| 5.4.3.3 | Weitere Vorgaben für die Modellerstellung: | 96 |
| 5.4.4 | Hydraulische Randbedingungen | 97 |
| 5.4.4.1 | Grundwasserneubildung | 97 |
| 5.4.4.2 | Leakage-Randbedingungen | 99 |
| 5.4.4.3 | Grundwasserentnahmen | 101 |
| 5.4.5 | Weitere Vorgaben für die Modellkalibrierung | 102 |
| 5.4.6 | Modellkalibrierung | 104 |
| 5.4.6.1 | Prinzipielle Vorgehensweise | 104 |
| 5.4.6.2 | Kalibrierungskriterien und -ziele | 106 |
| 5.4.6.3 | Praktische Durchführung der Modellkalibrierung | 107 |
| 5.4.7 | Ergebnis der Modellanpassung | 111 |
| 5.4.7.1 | Anpassungsgüte | 111 |
| 5.4.7.2 | Berechnete Verteilung der geohydraulischen Parameter | 111 |
| 5.4.7.3 | Großräumiges Grundwasserströmungsbild | 112 |
| 5.4.7.4 | Berechnete Grundwasserbilanz | 113 |
| 5.4.7.5 | Zusammenfassende Bewertung der Modellanpassung | 114 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Zusammenfassung | 116 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 120 |

Abbildungsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| Abb. 3-1: Datenverwaltung des Hierarchischen Datenmodells und des Netzwerkdatenmodells _____ | 15 |
| Abb. 3-2: Darstellung des Entity-Relationship-Modells an einem einfachen hydrogeologischen Beispiel _____ | 19 |
| Abb. 3-3: Darstellung des Entity-Relationship-Modells in tabellarischer Form an einem einfachen hydrogeologischen Beispiel _____ | 21 |
| Abb. 3-4: Unterschiede im Modellschichtenansatz des Standard MODFLOW Ansatzes und des True Layer Approachs _____ | 39 |
| Abb. 3-5: Modellgitter-Konfigurationen für die VCONT-Berechnung mit dem Standard MODFLOW Ansatz und dem True Layer Approach nach ANDERSON & WOESSNER (1992) _____ | 40 |
| Abb. 3-6: Unterschiedliches Schichtenkonzept des BCF-, LPF- und HUF-Package _____ | 42 |
| Abb. 5-1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in mm/a; Periode: 1891 – 1955, aus Klima von Hessen (1981 - 1985) _____ | 70 |
| Abb. 5-2: Die Basaltbasis im Vogelsberg (verändert nach EHRENBURG & HICKETHIER, 1985) _____ | 74 |
| Abb. 5-3: Die Basaltbasis im Vogelsberg – Profilschnitte durch den Vogelsberg (nach EHRENBURG & HICKETHIER, 1985) _____ | 75 |
| Abb. 5-4: Die Böden im Untersuchungsgebiet (nach Bodenübersichtskarte von Hessen M 1 : 300.000, 1989) _____ | 79 |
| Abb. 5-5: Grundwasserstandsganglinie der „GWM BG 2“, SWG AG, Datenbank-ID: 213 _____ | 83 |
| Abb. 5-6: Grundwasserstandsganglinie der „GWM BG 4“, SWG AG, Datenbank-ID: 206 _____ | 84 |
| Abb. 5-7: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Burkhardsfelden“, HLUg, Datenbank-ID: 460029 (aus www.hlug.de) _____ | 85 |
| Abb. 5-8: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Br. 34 tief“, SWG AG, Datenbank-ID: 212 _____ | 86 |
| Abb. 5-9: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Villingen“, OVAG, Datenbank-ID: 1132000 _____ | 87 |
| Abb. 5-10: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Villingen“, OVAG u. RPU Marburg, Datenbank-ID: 1312250 _____ | 88 |

Tabellenverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| Tabelle 3-1: Modellschichttypen des MODFLOW BCF-Package _____ | 38 |
| Tabelle 3-2: Randbedingungen in MODFLOW _____ | 43 |
| Tabelle 5-1: Größe der Grundwasserentnahmen für das Jahr 1994 und Zuordnung zu den modellrelevanten Grundwasserleitern bzw. Modellschichten _____ | 102 |

Abkürzungen und Konventionen

| | |
|----------|--|
| ASCII | American Standard Code of Information Interchange |
| BCF | Block Centered Flow |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | zirka |
| CAD | Computer Aided Design |
| CEVP | Central European Volcanic Provence |
| C++ | Programmiersprache |
| DB | Datenbank |
| DBMS | Database Management System |
| DDE | Dynamic Data Exchange |
| DDL | Data Definition Language |
| DE45 | Direct Solution |
| DGM | Digitales Gelände Modell |
| d.h. | das heißt |
| DML | Data Manipulation Language |
| DVGW | Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. |
| DVWK | Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| DXF | drawing exchange format |
| EDV | elektronische Datenverarbeitung |
| ERM | Entity-Relationship-Modell |
| EVAP | Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation |
| FD | Finite-Differenzen |
| FE | Finite-Elemente |
| FEMWATER | Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media |
| ggf. | gegebenenfalls |
| GIS | Geographisches Informationssystem |

| | |
|------------------|---|
| GMS | Groundwater Modeling System |
| GOK | Geländeoberkante |
| Gw | Grundwasser |
| GWM | Grundwassermessstelle |
| GWMS | Grundwassermanagementsystem |
| HGM | Hydrogeologisches Modell |
| HLFB | Hessisches Landesamt für Bodenforschung |
| HLUG | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie |
| HUF | Hydrogeologic Unit Flow |
| K/Ar | Kali / Argon |
| K_f | Durchlässigkeitsbeiwert |
| K_{fh} | horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert |
| K_{fv} | vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert |
| IMAP | Input, Management, Analysis and Presentation |
| LAN | Local Area Network |
| LMG | Link Algebraic Multigrid |
| LPF | Layer Property Flow |
| $l/s \cdot km^2$ | Liter pro Sekunde pro Quadratkilometer |
| M | Mächtigkeit |
| m | Meter |
| Mio. | Millionen |
| mm/a | Millimeter pro Jahr |
| MODFLOW | Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model |
| MP | Messpunkt |
| MPH | Messpunkthöhe |
| nFK | nutzbare Feldkapazität |
| nFKWe | nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum |
| ODBC | Open Database Connection |
| o.g. | oben genannte |
| OVAG | Oberhessische Versorgungsbetriebe AG |

| | |
|----------------|---|
| PC | Personal Computer |
| PCG2 | Preconditioned Conjugate Gradient |
| PEST | Parameter Estimation |
| PV | Pumpversuch |
| R-/H-Wert | Rechtswert / Hochwert |
| RWS | Ruhewasserspiegel |
| S | Speicherkoeffizient |
| S _Y | Specific Yield (Dimensionslos) |
| S _s | Specific Storage (1/m) |
| SDE | Spatial Database Engine |
| SIP1 | Strongly Implicit Procedure |
| sog. | sogenannte |
| SQL | Structured Query Language |
| SSOR1 | Succesive Over Relaxation |
| SWG AG | Stadtwerke Gießen AG |
| T | Transmissivität (m ² /s) |
| TK 25 | Topographische Karte Maßstab 1 : 25.000 |
| TWA | Trockenwetterabflussmessungen |
| u.a. | und andere |
| u.GOK | unter Geländeoberkante |
| USGS | United States Geological Survey |
| ü.NN | über Normal Null (Meereshöhe) |
| VBA | Visual Basic for Applications |
| VCONT | Vertical Conductance |
| VMDS | Version Managed Data Store |
| We | effektiver Wurzelraum |
| WSG | Wasserschutzgebiet |
| Wsp | Wasserspiegel |
| WWW | World Wide Web (Internet) |
| z.B. | zum Beispiel |

| | |
|------|-----------------|
| z.T. | zum Teil |
| 2D | zweidimensional |
| 3D | dreidimensional |
| 4D | vierdimensional |

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Problemstellung

Trinkwasser stellt auf der ganzen Welt das wichtigste Grundnahrungsmittel dar. Da ein Großteil des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen wird, kommt dem Grundwasserschutz weltweit eine ganz besondere Bedeutung zu. Aus diesem Grund wurden schon früh Methoden entwickelt, die dem Zwecke dienen, den Schutz und die dauerhafte Verfügbarkeit von Trinkwasser zu verbessern.

In der Bundesrepublik Deutschland werden ca. 70 % des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen. Daher stellt das Grundwasser in der Trinkwasserversorgung der Bundesrepublik Deutschland eine herausragende Rolle dar und ist in besonderem Maße schützenswert.

Das Grundwasser unterliegt vor allem in besiedelten Gebieten einer Beeinflussung durch den Menschen. Dies kann in qualitativer, aber auch in quantitativer Hinsicht geschehen. Beeinträchtigungen betreffen in gleichem Maße auch die Trinkwassernutzung aus Oberflächenwasser, jedoch findet im Zuge der vorliegenden Untersuchung eine Beschränkung auf die Grundwassernutzung statt. Deren Ergebnisse lassen sich auch auf die Nutzung von Oberflächenwasser in Talsperren zur Trinkwassergewinnung übertragen. Hier existieren häufig ähnliche Messstellennetze im Einzugsgebiet zur Überwachung der Grundwasserqualität wie in Grundwassergewinnungsgebieten.

Eine qualitative Beeinträchtigung durch den Menschen in besiedelten Gebieten findet zumeist in Form von punktförmigen Einträgen statt durch die Einleitung von Abwässern, die Versickerung von Mülldeponie-Sickerwässern, durch industrielle Abwässer, Schadensfälle oder Tankstellen. Weiterhin kann es in Form von linienförmigen Kontaminationsquellen wie Straßen oder defekten Abwasserkanälen zu einer Verunreinigung des Grundwassers kommen. In besiedelten Gebieten können auch flächenhafte anthropogene Belastungen des Grundwassers auftreten. Intensive landwirtschaftliche Nutzung stellt in Form einer potentiellen flächenhaften Belastungsquelle eine wichtige qualitative Beeinflussungsgröße für das Grundwasser dar (z.B. Ausbringung von großen Nitratmengen), jedoch stellen auch Industrie- und/oder Autoabgase in manchen gering besiedelten Gebieten eine qualitative Einflussgröße für das Grundwasser dar.

Auch die linienförmigen Elemente wie z.B. Straßen können in un- bzw. gering besiedelten Gebieten eine Kontaminationsquelle sein. Das so beeinflusste Grundwasser ist daher in manchen Fällen nicht oder nur nach einer aufwändigen Aufbereitung für die öffentliche Trinkwasserversorgung nutzbar.

Eine quantitative Beeinflussung des Grundwassers kann durch starke Grundwasserentnahmen sowohl in der Nähe von dicht besiedelten Gebieten als auch im ländlichen Raum stattfinden. Die hierdurch möglicherweise entstehenden Probleme sind z.B. Setzungsrisiken in bebauten Gebieten, langfristige Speicherentleerungen, gegenseitige Beeinflussung von Grundwasserentnahmen, die Verlagerung von Grundwasserverunreinigungen oder ökologische Beeinflussungen.

Speziell die Thematik der quantitativen Beeinflussung des Grundwassers mit scheinbar daraus resultierenden Setzungen und ökologischen Beeinflussungen ist im Untersuchungsgebiet Westlicher Vogelsberg immer noch aktuell, da vor allem der westliche Vogelsberg für das Rhein-Main-Gebiet eine wichtige Trinkwasserquelle darstellt. Diese Thematik wird im Kapitel 5 detaillierter besprochen werden.

Die oben dargestellten Probleme können in allen Trinkwassergewinnungsgebieten auftreten und sind nicht unbedingt abhängig von der Größe der jeweiligen Trinkwassergewinnung. Daher sollten sie bei aktuellen Fragestellungen zur Trinkwassergewinnung immer eine entsprechende Berücksichtigung finden. Dies erfolgt mittlerweile aufgrund des gewachsenen Problembewusstseins und der hohen Standards in der Bundesrepublik Deutschland auch zunehmend. In anderen Ländern, speziell in den ärmeren Ländern der Dritten Welt, sind die Probleme aufgrund der geringeren hygienischen Standards noch bedeutend brisanter. Wegen der schnell wachsenden Bevölkerungszahlen in der Dritten Welt kommt hier noch ein stetig steigender Wasserbedarf hinzu, der zu einer weiteren Verschärfung der Problematik führt.

Vor diesem Hintergrund sind die Bedeutung und die Anwendung von Grundwassermanagementsystemen zu sehen. Die Bedeutung und die Vorteile der Anwendung eines Grundwassermanagementsystems nehmen mit der Größe der betreffenden Trinkwassergewinnung und des bearbeiteten Gebiets zu.

1.2 Darstellung der Untersuchungen und Untersuchungsmethoden

Diese Arbeit befasst sich mit der wissenschaftlichen Analyse von Grundwassermanagementsystemen. Hierbei wird am Beispiel eines regionalen Trinkwassergewinnungsgebietes untersucht, welche Vorteile und Effekte die Anwendung von Grundwassermanagementsystemen hat. Grundwassermanagementsysteme kann man als eine Weiterentwicklung von (Geo-) Informationssystemen bezeichnen.

In einem einführenden Teil wird zunächst die Entwicklung der Grundwasserüberwachung nachgezeichnet, um die Grundlage für die Anwendung von Grundwassermanagementsystemen darzustellen. Diese Einführung stellt die Diskussionsbasis dar, ob und aus welchen Gründen die Einführung eines Grundwassermanagementsystems vorteilhaft ist und in welchen Fällen eine Einführung nicht notwendig ist.

Für die hier vorliegende Untersuchung wird die Erstellung und die Anwendung eines Grundwassermanagementsystems untersucht, das auf der Kombination einer Datenbank, eines Geographischen Informationssystems (GIS) und eines Grundwassermodells beruht.

Im Kapitel 3 werden dann die theoretischen Grundlagen der in dem Grundwassermanagementsystem verwendeten Teilsysteme und Anwendungen behandelt. Dieser theoretische Grundlagenteil beschränkt sich dabei aufgrund der umfangreichen Literatur zu den jeweiligen Teilsystemen auf die für diese Arbeit benötigten Grundlagen. Dabei wird auch jeweils eine zeitliche Entwicklung der einzelnen Teilsysteme aufgezeichnet, um die Synergieeffekte besser nachvollziehen zu können, die sich teilweise erst mit neueren Entwicklungen bei den einzelnen Teilsystemen ergeben.

Im folgenden Kapitel 4 wird dann die Anwendung eines Grundwassermanagementsystems am regionalen Beispiel des Gewinnungsgebietes Queckborn/Hessen der Stadtwerke Gießen AG (SWG AG) gezeigt. Hier lassen sich sehr gut die Vorteile und die Synergieeffekte der Anwendung eines Grundwassermanagementsystems veranschaulichen.

Die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems beginnt mit der Entwicklung eines Hydrogeologischen Modells für das Gewinnungsgebiet Queckborn zur Schaffung einer Planungsgrundlage und zur Abgrenzung des Rahmens für die Informationsbeschaffung. Auf

dieser Grundlage werden die notwendigen Daten beschafft, strukturiert und falls notwendig in die digitale Informationsebene übersetzt. Hierzu werden Daten und Gutachten von den betroffenen Wassergewinnungsanlagen, Klimadaten, Kartenmaterial und ein digitales Geländemodell herangezogen; diese sind beim HLUG, beim DWD, bei den zuständigen Regierungspräsidien, beim Hessischen Landesvermessungsamt und in der Literatur verfügbar.

Mit den vorhandenen Daten erfolgt die Umsetzung in das Grundwassermanagementsystem, die zunächst den Aufbau und die Strukturierung der Teilsysteme Datenbank und Geographisches Informationssystem umfasst.

Auf der bestehenden Datengrundlage wird unter Berücksichtigung und Verschneidung aller Informationen die Datengrundlage für das numerische Grundwassermodell erstellt, das entsprechend den Erfordernissen des Hydrogeologischen Modells aufgebaut wird. Hierbei erfolgt für das Untersuchungsgebiet zunächst eine detaillierte Beschreibung der regionalen Hydrogeologie und aller Parameter, die dem Grundwassermodell zu Grunde liegen. Auf dieser Basis wird mit Hilfe der vorhandenen Informationen ein flächenhafter Ansatz für die regionale Grundwasserstockwerksgliederung erstellt, auf der das numerische Grundwassermodell beruht.

Dieses numerische Grundwassermodell stellt das erste regionale Grundwassermodell für das Untersuchungsgebiet dar. Dieses Grundwassermodell schafft nicht nur für das Gewinnungsgebiet Queckborn eine Planungsgrundlage, sondern auch für alle relevanten Trinkwasserfassungen im Modellgebiet. Hiermit wird die kurzfristige Bearbeitung z.B. von grundwasserhaushaltlichen Planungen oder von Sanierungsszenarien eventueller Schadensfälle ermöglicht.

2 Die Entwicklung der Grundwasserüberwachung – Entwicklung von Grundwassermanagementsystemen

Trinkwasser stellt wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben auf der ganzen Welt das wichtigste Grundnahrungsmittel dar und somit kommt dem Trinkwasserschutz weltweit eine ganz besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung der Grundwasserüberwachung zu sehen.

Während z.B. die Römer schon früh eine überregionale Trinkwasserförderung betrieben, fand die Trinkwassergewinnung in Deutschland über viele Jahrhunderte zumeist in einem lokalen Maßstab statt, d.h. jede Siedlung hatte ihre eigene Trinkwassergewinnung. Diese Trinkwassergewinnung basierte dabei zumeist auf der Gewinnung von Oberflächenwasser oder der Fassung von Quellen. Häufig existierten aber auch schon Schachtbrunnen. Somit hatte die Trinkwassergewinnung in Deutschland lange Zeit nur eine lokale Bedeutung. Jedoch stellte man schon früh fest, nach dem Auftreten diverser Krankheiten, die auf der Verunreinigung des Trinkwassers beruhten, dass dem Trinkwasserschutz eine wichtige Bedeutung zukommt. Aufzeichnungen über die Trinkwassergewinnung existieren aus diesem Zeitraum fast keine. Falls Aufzeichnungen vorhanden sind, beschränken sie sich zumeist auf beschreibende Darstellungen, ob, wo und zu welchem Zweck eine Trinkwassergewinnung stattgefunden hat.

Mitte des 19. Jahrhunderts setzte dann in Deutschland zunehmend die überregionale Trinkwassergewinnung ein. Dies beruhte auf der zunehmenden Industrialisierung und der zunehmenden Ansiedlung in größeren Städten. Daraus resultierte ein ständig steigender Wasserbedarf, speziell in den größeren überregionalen Zentren wie z.B. dem Rhein-Main-Gebiet. Als ein gutes Beispiel kann hierfür die Entwicklung der Trinkwassergewinnung im Vogelsberg herangezogen werden, die eng mit der industriellen Entwicklung im Rhein-Main-Gebiet südlich des Vogelsberges verbunden ist. Der ständig steigende Wasserbedarf führte bereits Mitte des 19. Jahrhunderts zur Planung der Versorgung des Rhein-Main-Gebietes durch Grundwasser aus dem Vogelsberg und schon im Jahre 1873 wurde die erste Fernwasserleitung aus dem Vogelsberg aus dem Wasserwerk Fischborn zum Rhein-Main-Gebiet fertig gestellt. Dabei fand zunächst die Erschließung der vorhandenen Quellen mit Quelfassungen statt,

jedoch setzte sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts immer mehr der Bau von Schachtbrunnen durch.

Aus der Sicht der Grundwasserüberwachung ist festzustellen, dass aus den frühen Jahren dieser vermehrten Trinkwassergewinnung nur sehr spärliche Aufzeichnungen vorhanden sind. Die Menge der Aufzeichnungen nimmt jedoch Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich zu. Dabei handelt es sich zunächst hauptsächlich um Aufzeichnungen über die Grundwasserentnahmemenge pro Jahr. Eine weitergehende Grundwasserüberwachung fand zunächst nicht statt. Als Beispiel ist hier die Erschließung des Gewinnungsgebietes Queckborn für die stark wachsende Stadt Gießen zu nennen. Aufzeichnungen über die Erkundung und folgende Erschließung des Gewinnungsgebietes gegen Ende des 19. Jahrhunderts finden sich nur in der Pfarrchronik der Evangelischen Pfarrei Queckborn, von der eine Abschrift von GRÜNEWALD (1948) existiert. Hier wurde aufgrund der Nähe zur Stadt Gießen und der Erkennung des dort vorhandenen großen Gewinnungspotentials im späteren „Brunnengarten“ bereits 1894 der erste Brunnen mit einer Tiefe von ca. 10 m gegraben. Die Aufzeichnungen über den Bau und den Betrieb des ersten Brunnens in Queckborn sind dabei zumeist eher beschreibender Natur, jedoch finden sich hier auch schon Angaben über Schüttungen des Überlaufs, eine erste qualitative Analyse und Angaben über die tägliche Förderleistung der Pumpen.

Am Anfang des 20. Jahrhunderts fanden dann die ersten regelmäßigen Grundwasserstandsmessungen statt. Diese Messungen zu Beginn wurden vor allem noch von staatlicher Seite durchgeführt. Als erste Messstelle im Untersuchungsgebiet wurde der Schachtbrunnen in Wölfersheim zur Grundwassermessstelle im Jahr 1913 umfunktioniert. Diese Umnutzung von Schachtbrunnen in Grundwassermessstellen fand zu Beginn der Grundwasserstandsüberwachung noch sehr häufig statt.

Am Beispiel des Untersuchungsgebietes lässt sich gut zeigen, dass durch den Wirtschaftsaufschwung in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts erneut eine Phase von großen Trinkwassererschließungen stattfand. Innerhalb dieser Zeitspanne wurden im Untersuchungsgebiet insgesamt 175 Wassergewinnungsanlagen gebaut. Hierbei wurden häufig auch bestehende Wassergewinnungsgebiete erweitert wie z.B. das für das Rhein-Main-Gebiet wichtige Gewinnungsgebiet von Inheiden (OVAG). Aufgrund der vermehrt auftretenden

qualitativen Probleme durch zunehmende Düngung in der Landwirtschaft wurden nun hauptsächlich Tiefbrunnen gebohrt. Somit zog die qualitative Grundwasserüberwachung eine veränderte Planung von Trinkwassererschließungen nach sich.

Im Rahmen dieser großen Grundwassererschließungen fand dann auch eine deutlich zunehmende Grundwasserüberwachung statt. Der Großteil der staatlichen Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet stammt aus den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts. Auch die OVAG, die in vielen Bereichen innerhalb des Untersuchungsgebietes Gewinnungsgebiete erschlossen hat, baute sehr viele Grundwassermessstellen in diesem Zeitraum.

Ein weiterer Schub in der Grundwasserüberwachung erfolgte dann Ende der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts. Aufgrund einer extrem geringen Grundwasserneubildung in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts und bei stetig steigender Wasserförderung mit demzufolge stark sinkenden Grundwasserpotentialen traten in den Gewinnungsgebieten des Vogelsberges eine Reihe von Problemen auf, zu denen unter anderem vermehrte Setzungen (auch an Häusern) und das Trockenfallen von Quellen, Feuchtbiotopen und Bächen gehörten. Dies veranlasste vor allem den überregionalen Trinkwasserversorger OVAG zu einem verstärkten Bau von Grundwassermessstellen.

Diese Entwicklung führte in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts zu einer deutlichen Veränderung der bestehenden Wasserpolitik. Seitdem finden auch ökologische Aspekte in den bestehenden Gewinnungsgebieten des Vogelsberges eine deutlich größere Berücksichtigung. Somit ist zu der bestehenden Grundwasserüberwachung in Form der Aufzeichnung der Wasserentnahme und der Grundwasserstandsüberwachung an Grundwassermessstellen und Brunnen noch ein weiterer Aspekt hinzugekommen, die Überwachung der ökologischen Auswirkungen der Trinkwassergewinnung.

Weiterhin werden nun auch die Auswirkungen der Trinkwassergewinnung auf mögliche Setzungen an bestehenden Gebäuden überwacht. Dies stellt dabei einen sehr schwer zu überwachenden Teil in der Grundwasserüberwachung dar, da hier häufig nur indirekt Rückschlüsse auf die entnahmebedingten Setzungen möglich sind. Dabei lässt sich jedoch mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells feststellen, welche

Grundwasserpotentialschwankungen natürlich bedingt sind und welche aufgrund einer bestehenden Trinkwassergewinnung auftreten.

Bei der Grundwasserüberwachung ist generell festzustellen, dass der Umfang der für eine Grundwasserüberwachung relevanten Daten mit der Zeit zunimmt. Zu Beginn der Trinkwassergewinnung stellten vor allem schriftliche Aufzeichnungen die Grundlage für eine mögliche Grundwasserüberwachung dar. Teilweise sind auch diese Unterlagen nicht vorhanden bzw. wurden niemals erstellt. Diese Aufzeichnungen werden dabei meistens erst im Laufe der Zeit besser und detaillierter, was auch auf entsprechende Regularien von Seiten der Behörden zurückzuführen ist.

Einen großen Schub für eine bessere Grundwasserüberwachung gab es durch die Entwicklungen auf der Seite der Personal Computer (PC) mit Beginn der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts. Auch wenn die Durchsetzung des PC-Systems noch eine ganze Zeit dauerte, war es doch hiermit nun möglich, Daten digital zu speichern und somit schneller verfügbar zu machen.

Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgten alle Aufzeichnungen zur Grundwasserüberwachung in analoger Form. Alle Grundwasserstandsaufzeichnungen, Entnahmedaten und qualitativen Bestimmungen wurden im Papierformat festgehalten und lagen somit nur in Form von meist sehr umfangreichen Datenordnern vor.

Erst mit Hilfe der rasanten Entwicklungen auf der PC-Ebene ist es nun überhaupt möglich, eine Grundwasserüberwachung durchzuführen, wie sie hier vorgestellt wird.

Die Datenfülle, die im Rahmen einer hochwertigen Grundwasserüberwachung anfällt, ist schon bei einem vergleichsweise kleinen Trinkwassergewinnungsgebiet im Laufe der Jahre erheblich. Die vorhandenen Daten für ein Trinkwassergewinnungsgebiet werden mit der Zeit immer unübersichtlicher und stellen daher häufig einen vorhandenen Datenpool dar, der ohne EDV-Unterstützung nicht mehr die mögliche Nutzung findet bzw. finden kann.

Die Datenmenge wächst in der Regel mit der Größe des Untersuchungsgebietes, und es lässt sich feststellen, dass sie mittlerweile in analoger Form häufig nicht mehr zu bewältigen ist. Dabei ist zu beachten, dass auch die Informationen, die in den vielen Gutachten, die zu den meisten Trinkwassergewinnungsgebieten existieren, für weitere Gutachten und ein

entsprechendes Grundwassermanagementkonzept zu berücksichtigen sind. Daher müssen normalerweise bei der Erstellung eines neuen Gutachtens zu einem Trinkwassergewinnungsgebiet alle vorhandenen Daten und Gutachten aufbereitet werden, um keine relevanten Aspekte zu vernachlässigen. Diese Aufbereitung der vorhandenen Daten und Gutachten kostet jedoch sehr viel Zeit und Geld.

Die Aufbereitung der vorhandenen Daten und Gutachten sollte daher einmal für die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems durchgeführt werden, um sie dann für die Zukunft stets in digitaler Form zur Verfügung zu haben. Das Hinzufügen neuer Daten stellt dann nur noch einen vergleichsweise sehr geringen Aufwand dar, so dass bei einer entsprechenden Pflege des Datenbestands immer alle für ein optimales Grundwassermanagementsystem notwendigen Daten vorhanden bzw. verfügbar sind.

3 Aufbau von Grundwassermanagementsystemen

3.1 Vorbemerkungen

Grundwassermanagementsysteme oder auch Informationssysteme im Allgemeinen stellen eine Kombination verschiedener Einzelelemente dar. Reine Informationssysteme beruhen zunächst nur auf der Kombination von Daten in einer Datenbank. Für ein Geographisches Informationssystem ist zusätzlich noch ein räumlicher Bezug der Daten notwendig. In der hier dargestellten Form eines Grundwassermanagementsystems kommt zusätzlich noch die Kopplung mit einem numerischen Grundwassermodell hinzu.

Zur grundlegenden Klärung des Begriffs Informationssysteme, von denen ein Grundwassermanagementsystem eine bestimmte Form darstellt, ist es zunächst notwendig, die Begriffe Daten, Information, System und Wissen zu definieren. Hierbei ist zu beachten, dass speziell zwischen den Begriffen Daten und Informationen häufig eine Unklarheit in der Begrifflichkeit existiert.

Daten kann man zunächst als eine Abbildung der Realität in digitaler Form beschreiben. Sie stellen mit ihrem digitalen Zustand - z.B. gespeichert in einer Datenbank - zunächst noch keine Information dar. Information lässt sich im Gegensatz dazu als Antwort auf eine bestimmte Frage bezeichnen, die zur Klärung einer spezifizierten Problemstellung des Fragenden beiträgt. Die Information ist somit nicht unbedingt mit den echten Daten verknüpft, basiert jedoch zumeist darauf. Darauf aufbauend stellt das Wissen eine Gesamtheit der vorhandenen Daten, Informationen und anderer Erfahrungen dar. Das Wissen hat somit bei diesen Begriffen die höchste Wertigkeit. Als ein System kann man eine Menge von Einzelelementen bezeichnen, die miteinander in Verbindung stehen. Diese Verbindungen nennt man Relationen.

Somit stellt ein Informationssystem ein definiertes System dar, das auf einer Anzahl von Einzelelementen beruht, die miteinander in Beziehung stehen und Informationen austauschen (vgl. SCHMIDT 1996). Mit Hilfe eines Informationssystems wird ermöglicht, ausgehend von digitalisierten Daten bestimmte Fragen zu formulieren, um aus den vorhandenen Daten Informationen zu kreieren und zu kombinieren, die dann zu einer Erhöhung des Wissens des Fragenden bezüglich einer realen Problemstellung führen. Die Begrenzung des

Informationsgehaltes wird dabei von dem Umfang und der Qualität der zugrunde liegenden Daten und dem aktuellen Stand der PC- und Softwaretechnologie bestimmt.

Geo-Informationssysteme bzw. Grundwassermanagementsysteme stellen dabei eine spezielle Anwendung von Geographischen Informationssystemen dar. Wie bereits zuvor festgestellt, ist hierbei zu beachten, dass bei Geographischen Informationssystemen und dementsprechend auch bei Geo-Informationssystemen und Grundwassermanagementsystemen - im Gegensatz zu allgemein gültigen Informationssystemen - immer raumbezogene Daten verarbeitet werden.

Geographische Informationssysteme finden dabei nicht nur im Bereich der Geowissenschaften (Geologie und Geographie) ihre Anwendung, sondern zunehmend im nicht geowissenschaftlichen Bereich. Hier sind z.B. Vertriebsplanungen großer Firmen, räumliche Kundendatenanalysen oder Standortplanungen von Schnellrestaurant-Ketten zu nennen.

3.2 Datenbanksysteme - Grundwasserdatenbank

Die Anforderung an die Datenhaltung nimmt in allen Bereichen der Wirtschaft und Wissenschaft zu. Es ist immer zu gewährleisten, dass die Daten den unterschiedlichen Anwendern und Anwendungen (Programmen) schnell verfügbar sein müssen und nicht doppelt gespeichert werden. Weiterhin ist zu beachten, dass der Umfang der vorhandenen Daten häufig mit exponentiellem Wachstum zunimmt. Dieses Anforderungsspektrum stellt sich der Datenverwaltung und ist mittlerweile ohne Datenbanken nicht mehr zu beherrschen.

Auch im Bereich der hier bearbeiteten Geowissenschaften und speziell der Hydrogeologie nimmt der Umfang vorhandener Daten häufig exponentiell zu. Dies wird z.B. durch den Umfang an Grundwasserstandsmessungen und den daraus resultierenden Daten verdeutlicht. Wurden früher zumeist nur Grundwasserstichtagsmessungen mit dem Lichtlot im wöchentlichen, monatlichen oder auch jährlichen Rhythmus durchgeführt, kommen jetzt immer häufiger Datenlogger zum Einsatz, die neben den Grundwasserpotentialmessungen auch weitere Parameter wie die Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit u.a. im frei wählbaren Rhythmus aufzeichnen; hier sind minütliche oder stündliche Aufzeichnungen keine Seltenheit. Eine Datenhaltung und Datenverarbeitung ist auch hier ohne Datenbanken nicht mehr denkbar.

Die Gründe für den Einsatz eines Datenbank-Systems lassen sich in Anlehnung an KEMPER & EICKLER (1999) wie folgt zusammenfassen:

- **Redundanzen und Inkonsistenz:** Wenn Daten in einzelnen Dateien abgespeichert werden und hier teilweise die gleichen Informationen enthalten sind, entsteht sehr schnell eine Inkonsistenz, weil in diesem Fall immer gewährleistet werden muss, dass alle gleichen Daten in jeder einzelnen Datei abgeändert werden müssen. Zusätzlich entsteht hier eine Mehrfachspeicherung von Informationen, eine redundante Speicherung, die unter anderem aufgrund von erhöhten Datenmengen nicht gewünscht ist.
- **Integritätsverletzungen:** In vielen Anwendungsbereichen existieren bestimmte Bedingungen und Abhängigkeiten, sogenannte Integritätsbedingungen, die ohne den Einsatz eines Datenbanksystems nicht gewährleistet werden können. So kann z.B. eine Information zu einem Objekt nur existieren, wenn das Objekt existiert. Ohne Datenbanksysteme könnte man Informationen zu diesem Objekt auch speichern, obwohl es eigentlich nicht mehr existiert. Auch mehrfache Abhängigkeiten lassen sich ohne ein Datenbanksystem nur sehr schwer darstellen und dementsprechend ist die Gewährleistung der Datenintegrität sehr aufwendig.
- **Datenverlust:** Werden Daten in vielen Dateien gehalten, kann es aufgrund von Anwendungsfehlern schneller zum Verlust einer einzelnen Datei kommen, ohne die der gesamte Datensatz somit nicht mehr konsistent ist.
- **Verknüpfungsmöglichkeiten:** Auch die Verknüpfungsmöglichkeiten völlig verschiedener Daten ist sehr aufwendig, wenn die Daten in unterschiedlichen Dateien gehalten werden. In einer Datenbank lassen sich alle Daten problemlos miteinander verknüpfen.
- **Mehrbenutzerbetrieb:** Bei einem Netzwerkbetrieb, der bei der Bearbeitung großer Datensätze der Regelfall ist, kann es bei einer Datenhaltung in verschiedenen Dateien sehr schnell zu einem Datenverlust kommen oder zu Inkonsistenzen, da die heutigen Dateisysteme fast keine Kontrollmechanismen für den Mehrbenutzerbetrieb bieten. Bei einer Datenbank lässt sich ein Mehrbenutzerbetrieb gewährleisten, indem ein aktuell

bearbeiteter Datensatz für eine weitere Benutzung gesperrt wird. Gleichzeitig können jedoch alle gerade nicht bearbeiteten Datensätze freigegeben werden. Es wird somit ein zeitgleicher Zugriff auf die Datenbank gewährleistet.

- **Sicherheitseigenschaften:** Je nach Anwendungsgebiet sollen möglicherweise bestimmte Daten nur bestimmten Benutzern verfügbar sein oder auch unterschiedliche Nutzer sollen unterschiedliche Nutzerrechte wie reine Leserechte bzw. auch Schreibrechte erhalten. Mit den heutigen Dateisystemen lassen sich zwar einzelnen Ordnern und/oder Dateien unterschiedliche Benutzerrechte zuweisen, jedoch müssten somit wieder Daten in verschiedenen Dateien und/oder Ordnern gespeichert werden. Mit den Datenbanken lassen sich sehr einfach unterschiedlichen Nutzern unterschiedliche Nutzerrechte zuweisen.

3.2.1 Entwicklung von Datenbanksystemen

Bei den vorhandenen Datenbanksystemen lässt sich im Laufe der Jahre eine Entwicklung feststellen. Die Datenmodelle, die den entsprechenden Datenbanken zugrunde liegen, unterscheiden sich sehr.

Die vorhandenen Datenbanken lassen sich nach KEMPER & EICKLER (1999) in folgende Datenmodell-Gruppen einteilen:

- Hierarchisches Datenmodell
- Netzwerkmodell
- Relationales Datenmodell
- Deduktives Datenmodell
- Objektorientiertes Datenmodell

Allerdings haben das Hierarchische Datenmodell sowie das Netzwerkmodell nur noch eine historische Bedeutung. Auf diesen Datenmodellen basierende Datenbanken werden in Firmen nur noch in bereits seit vielen Jahren existierenden Datenbanken fortgeführt, wenn eine Umstellung auf die aktuelleren Datenmodelle sehr aufwendig und kostenintensiv ist. Das

Hierarchische Datenmodell kann man in seiner Organisationsstruktur wie einen ungeordneten Baum beschreiben, wobei die Blätter (Knoten) durch Äste (Kanten) miteinander fest verbundene Datensätze darstellen. Aufgrund dieser Struktur muss man ein gutes Verständnis der Gesamtdatenstruktur besitzen, um von einem Datensatz (Knoten) über die Kanten zu dem gewünschten Datensatz zu gelangen. Das Hierarchische Datenmodell beruht auf den Strukturkomponenten **Recordtypen** (Klassen), die eine Vielzahl von Attributen umfasst und den **Parent-Child-Relationships**, die einen 1 : M Verbindungstyp darstellen mit der Charakterisierung zwischen Parent = „Eltern“ (1) und Child = „Kind“ (M).

Die Netzwerkmodelle stellen eine Weiterentwicklung der Hierarchischen Datenmodelle dar. Hiermit wurde das sehr restriktive Hierarchische Datenmodell um eine Reihe von Freiheitsgraden erweitert. Dabei wurde zu der Sortierung der Daten in ihrer Reihenfolge von „Oben nach unten“ des Hierarchischen Datenmodells die Option von logischen Verzweigungen zur Seite ermöglicht. Das Netzwerkmodell beruht analog zum hierarchischen Modell auf der Datenstruktur **Recordtyp**, einer Klasse, die die Attribute beinhaltet, und dem **Set**, der die 1 : M Beziehungen zwischen den Klassen beschreibt. Hierbei ist aufgrund der zusätzlichen seitlichen Verzweigungen eine noch genauere Kenntnis der Datenstruktur und der vorhandenen Daten notwendig.

Problematisch bei beiden Datenmodellen ist die Selbstverwaltung der Daten, bei der jedes Anwendungsprogramm alle Befehle beinhaltet, die zur Bearbeitung der jeweiligen Daten notwendig sind. Hierbei muss oft eine Reihe von Programmen nacheinander bearbeitet werden, um von einem Ausgangsdatensatz bzw. einer Ausgangsdatei über mehrere Zwischenstufen und Zwischendatensätze zu einem gewünschten Ergebnis zu gelangen. Somit müssen häufig mehrere verschiedene Programme bearbeitet und beherrscht werden, um ein gewünschtes Ergebnis zu erhalten. Hierdurch entstehen sehr leicht Redundanzen, da gleiche Daten oft in verschiedenen Dateien gespeichert werden müssen.

Das Konzept dieser Datenmodelle wird noch einmal in der Abbildung 3.1 dargestellt.

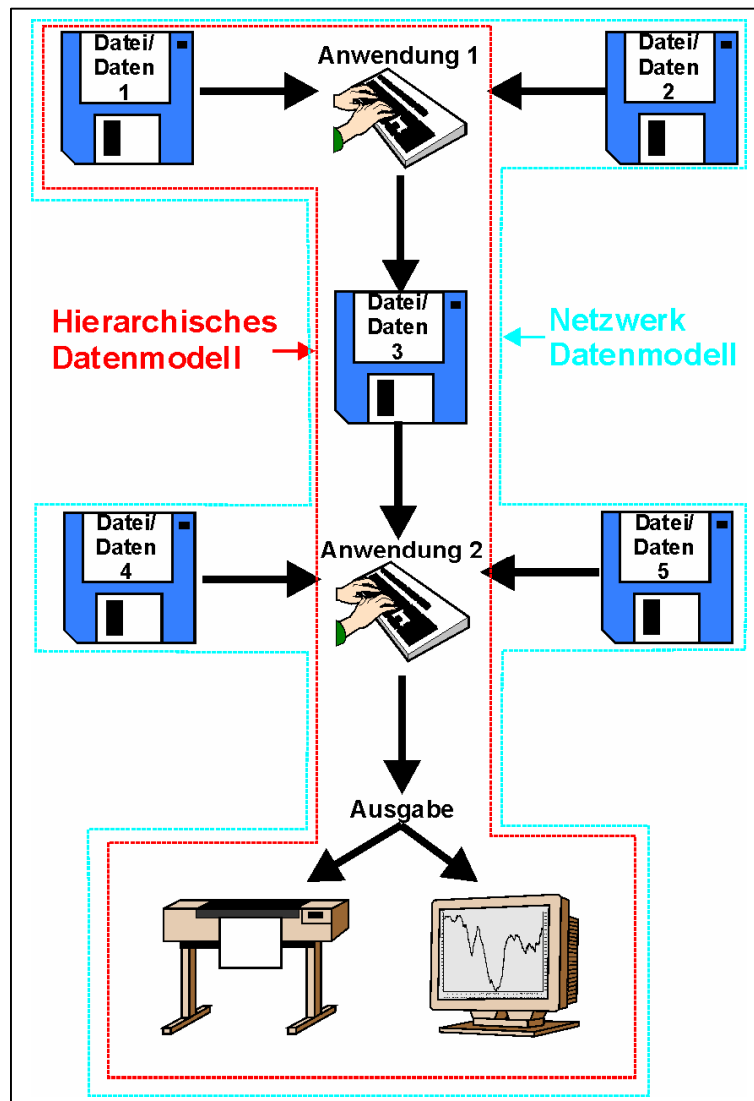


Abb. 3-1: Datenverwaltung des Hierarchischen Datenmodells und des Netzwerkdatenmodells

Das relationale Datenmodell (siehe Kapitel 3.2.2) fand aufgrund seiner Einfachheit eine sehr große Verbreitung. Datenbanken, die auf dem relationalen Datenmodell beruhen, waren lange Zeit marktbeherrschend.

Das deduktive Datenmodell stellt eine Erweiterung des relationalen Datenmodells dar. Es findet dabei eine Erweiterung um eine Regel- und Deduktionskomponente statt, womit es auf der Logik erster Stufe basiert. Daher wird das deduktive Datenmodell auch gelegentlich als Logik-Datenmodell bezeichnet.

Die objektorientierten Datenmodelle stellen nach den relationalen Datenbanken die nächste Stufe der Datenbankentwicklung dar. Sie wurden Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts

entwickelt und beruhen auf den Ansätzen, die man bei den objektorientierten Programmiersprachen wie z.B. C++ verwendet. Hierbei werden Objekt-Attribute und Objekt-Operationen nicht getrennt, sondern bilden zusammen eine Klasse. Bei den objektorientierten Datenmodellen können auch eigene Datentypen definiert werden. Die Objekte lassen sich hier miteinander frei verknüpfen. Aufgrund der Komplexität des reinen objektorientierten Datenmodells erfuhr es bisher nicht die Verbreitung, die man dank seiner Möglichkeiten erwartet hätte. Aufgrund der Möglichkeiten, die das objektorientierte Datenmodell jedoch bietet, setzten sich im Gegensatz dazu im Laufe der Zeit immer mehr die Kombination zwischen relationalen Datenbanken und objektorientierten Datenbanken durch. Hierbei wurden Elemente des objektorientierten Datenmodells in das relationale Datenmodell übertragen und somit Kombinationen der beiden Datenmodelle geschaffen. Dieses Datenmodell wird häufig als objekt-relacionales Datenmodell bezeichnet und ist mittlerweile marktbeherrschend. Es findet auch bei der hier erstellten Grundwasserdatenbank seine Verwendung. Das objekt-relacionale Datenmodell beruht im Wesentlichen auf den Grundlagen des relationalen Datenmodells, die im Folgenden erläutert werden.

3.2.2 Aufbau des relationalen Datenmodells

Das relationale Datenmodell beruht auf Grundlagen, die erstmals von CODD (1970) formuliert wurden. Er führt eine mathematische Darstellung und strikte Trennung von physischer Datenspeicherung und logischer Datenmodellierung ein. CHEN (1976) stellt ein den relationalen Datenbanken zugrunde liegendes Konzept vor, das sog. Entity-Relationship-Modell (ERM), das die reale Welt in einer Anzahl von physikalisch und konzeptionell unabhängigen Gegenständen (Entities) bzw. Objekten darstellt, die wiederum miteinander in Beziehung (Relationship) stehen können. Zusätzlich dazu existieren im Entity-Relationship-Modell auch sogenannte Attribute und Rollen der einzelnen Gegenstände.

Einzelne Gegenstände mit ähnlichen Eigenschaften werden dabei zu sogenannten Gegenstandstypen (Entitytypen) zusammengefasst, die in einer graphischen Darstellung als Rechtecke mit dem Namen des Entitytyps in der Mitte dargestellt werden. In analoger Weise werden ähnliche Beziehungen dabei zu Beziehungstypen zusammengefasst. Sie werden als

Rauten graphisch dargestellt. Die Attribute charakterisieren die einzelnen Gegenstände. Beziehungen werden aber auch in Form von Kreisen oder Ovalen abgebildet.

Weiterhin gibt es noch die sogenannten Schlüssel. Sie stellen ein bestimmtes Attribut oder eine bestimmte Kombination von Attributen dar, deren Werte den jeweiligen Gegenstand eindeutig innerhalb seines Gegenstandstyps identifizieren. Diese Schlüssel werden häufig künstlich hinzugefügt, wenn sich kein Attribut oder keine Kombination von Attributen als Schlüssel eignet. Das hinzugefügte Attribut existiert bei dem Gegenstand in der Realität nicht. Schlüssel werden durch Unterstreichung oder auch durch doppelt gezeichnete Kreise bzw. Ovale graphisch dargestellt.

Die für die Datenstrukturierung sehr wichtigen Beziehungstypen **R** zwischen den einzelnen Entitytypen **E_n** lassen sich als eine Relation im mathematischen Sinn charakterisieren.

Die Ausprägung der Beziehung **R** stellt nach KEMPER & EICKLER (1999) eine Teilmenge des kartesischen Produkts der beteiligten Entitytypen **E_n** dar und lässt sich wie folgt definieren:

$$R \subseteq E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$$

Es ist dabei zu beachten, dass es unterschiedliche Beziehungstypen gibt und auch die Richtung der Beziehung bei den 1:n-Beziehungen bzw. n:1-Beziehungen zwingend ist. Hierbei lassen sich vier verschiedene Beziehungstypen unterscheiden:

- **1 : 1 – Beziehung:** Jedem Gegenstand (Entity) e_1 aus E_1 kann maximal ein Gegenstand e_2 aus E_2 zugeordnet werden. Dies gilt genauso in umgekehrter Weise, d.h. jedem einzelnen Gegenstand e_2 aus E_2 kann höchstens ein Gegenstand e_1 aus E_1 zugeordnet werden. Die Zuordnung eines einzelnen Gegenstandes e_1 aus E_1 zu einem weiteren Gegenstand e_2 aus E_2 und umgekehrt ist jedoch nicht zwingend notwendig, d.h. es können auch Gegenstände e_1 aus E_1 ohne Zuordnung zu einem Gegenstand e_2 aus E_2 und umgekehrt existieren.
- **1 : n – Beziehung:** Jedem Gegenstand e_1 aus E_1 können beliebig viele Gegenstände aus E_2 zugeordnet werden. Die Anzahl der zugeordneten Gegenstände aus E_2 zu einem Gegenstand e_1 aus E_1 liegt dabei zwischen keinem und unendlich

vielen. In umgekehrter Richtung kann jedoch einem Gegenstand e_2 aus E_2 maximal nur ein Gegenstand e_1 aus E_1 zugeordnet werden.

- **n : 1 – Beziehung:** Entspricht der umgekehrten Beziehung zur oben genannten 1 : n - Beziehung. Einem Gegenstand e_2 aus E_2 können beliebig viele Gegenstände aus E_1 zugeordnet werden. Die Anzahl der zugeordneten Gegenstände aus E_1 zu einem Gegenstand e_2 aus E_2 liegt dabei zwischen keinem und unendlich vielen. In umgekehrter Richtung kann jedoch einem Gegenstand e_1 aus E_1 maximal nur ein Gegenstand e_2 aus E_2 zugeordnet werden.
- **n : m – Beziehung:** Jedem Gegenstand e_1 aus E_1 können beliebig viele Gegenstände aus E_2 zugeordnet werden. Die Anzahl der zugeordneten Gegenstände aus E_2 zu einem Gegenstand e_1 aus E_1 liegt dabei zwischen keinem und unendlich vielen. In umgekehrter Richtung gilt dasselbe in analoger Weise, d.h. jedem Gegenstand e_2 aus E_2 können beliebig viele Gegenstände aus E_1 zugeordnet werden. Die Anzahl der zugeordneten Gegenstände aus E_1 zu einem Gegenstand e_2 aus E_2 liegt dabei zwischen keinem und unendlich vielen.

Hierbei ist zu beachten, dass die Definition dieser Beziehungen in der Realität immer gelten muss, d.h. sie bildet eine Gesetzmäßigkeit ab, deren Einhaltung keine Ausnahme erlaubt.

Im Folgenden werden an einem einfachen Beispiel aus der Hydrogeologie die Funktionsweise und die Eigenschaften des Entity-Relationship-Modells dargestellt.

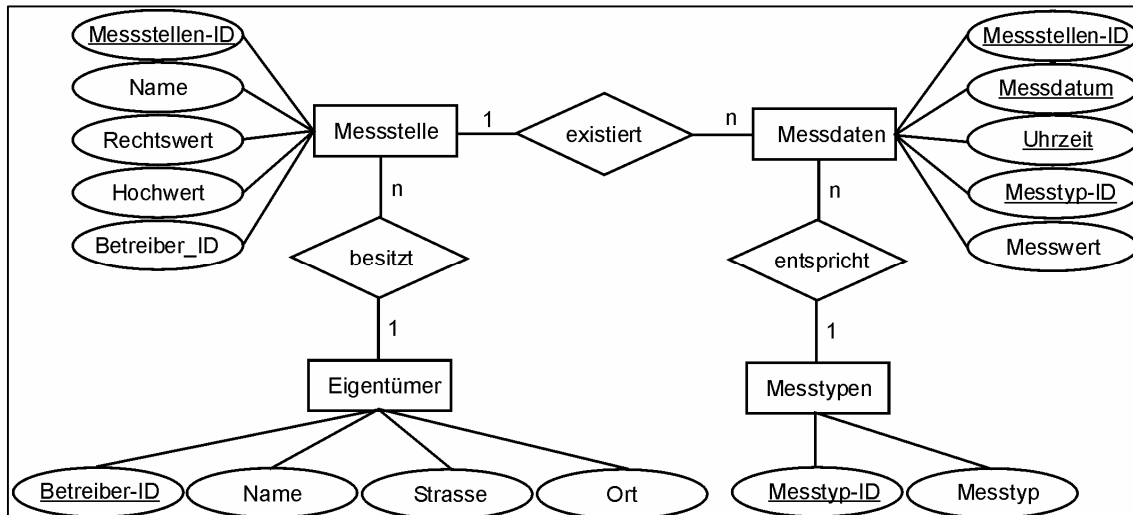


Abb. 3-2: Darstellung des Entity-Relationship-Modells an einem einfachen hydrogeologischen Beispiel

Die Funktionsweise der oben beschriebenen Beziehungen lässt sich dabei noch zusätzlich unterscheiden. Es gibt bei den Beziehungen häufig einen „schwachen“ und einen „starken“ Partner. Die sogenannten „schwachen“ Partner sind Gegenstände, deren Existenz von einem anderen Gegenstand abhängig ist und die häufig nur durch Schlüssel des zugeordneten Partners eindeutig identifizierbar sind.

Diese Unterscheidung zwischen einem „schwachen“ Partner und einem „starken“ Partner wird mit der Funktion der Wahrung der referentiellen Integrität gewährleistet. Mit diesem Regelsystem wird sichergestellt, dass Beziehungen zwischen verknüpften Entitytypen gültig sind und verknüpfte Daten nicht versehentlich gelöscht oder geändert werden. Bei dem relationalen Datenbanksystem MS Access lässt sich dabei noch zusätzlich unterscheiden, ob bei aktivierter referentieller Integrität eine Aktualisierungsweitergabe des verknüpften Schlüsselfelds an den sogenannten „schwachen“ Partner erfolgt oder eine Änderung dieses Schlüsselfelds nicht gestattet wird und/oder ob eine Löscherweitergabe an den sog. „schwachen“ Partner erfolgt oder ob ein Löschen eines „starken“ Partners nicht gestattet wird, falls verknüpfte Detaildatensätze existieren.

Dies lässt sich recht gut an dem oben dargestellten einfachen Beispiel aus der Hydrogeologie erläutern. In der Beziehung zwischen dem Entitytyp Messstelle und dem Entitytyp Messdaten stellt der Entitytyp Messstelle den starken Partner dar. Es können keine Messdaten existieren, wenn es keine Messstelle gibt. Somit wäre in diesem Fall die Wahrung der referentiellen

Integrität notwendig. Messdaten ohne eine entsprechende Messstelle geben keinen Sinn. Ob eine Aktualisierungsweitergabe oder eine Löschowweitergabe erlaubt wird, hängt in diesem Falle von der Auffassung des Datenbank-Designers und den Vorgaben der Realität ab. Stellt die Messstellen-ID keinen künstlichen Schlüssel dar, sondern eine externe „echte“ Schlüsselnummer, so ist eine Aktualisierungsweitergabe zu verbieten. Stellt sie jedoch nur eine künstliche Nummer dar für das Datenbank-Design, so ist die Änderung dieser Schlüsselnummer möglicherweise durchaus wünschenswert und somit sollte eine Aktualisierungsweitergabe erfolgen. Vor dem Hintergrund, dass ein Löschen von Messstellen vom Autor als nicht gewünscht angesehen wird, da dies dem Prinzip der Sammlung vorhandener Daten widerspricht, sind trotzdem auch bei der Löschowweitergabe beide Möglichkeiten nachvollziehbar. Sollen z.B. häufiger alte Messstellen mit den dazugehörigen Daten gelöscht werden, ist die Löschowweitergabe zu aktivieren. Dies erspart dem Datenbank-Benutzer bei vielen verknüpften Entitytypen und darin enthaltener Daten sehr viel Arbeit, da er ohne aktivierte Löschowweitergabe zunächst alle verknüpften Detaildaten löschen muss, bevor er die entsprechende Messstelle löschen kann. Kommt dies jedoch nur sehr selten vor, sollte dies als kleine Sicherheitsfunktion für ein ungewolltes Löschen von Messstellen eingebaut werden und somit die Löschowweitergabe nicht aktiviert werden. Es gibt aber auch Fälle, bei denen die Wahrung der referentiellen Integrität nicht gefordert werden muss. Dies gilt z.B. bei dem oben angegebenen Beispiel für die Betreiber. Falls ein Betreiber nicht mehr existiert, müssen nicht automatisch alle Messstellen mit den verbundenen Datensätzen gelöscht werden. An diesem Beispiel lässt sich auch zeigen, dass eine 1:n - Beziehung nicht immer von gleicher Wertigkeit ist. Ergibt die Aufnahme eines Betreibers ohne eine Messstelle oder einen Brunnen in eine Datenbank keinen Sinn, kommt ein Messtyp oder eine Messstelle ohne entsprechende Messdaten durchaus häufiger vor.

Das Konzept der relationalen Datenbank beruht dabei auf einer Anzahl von Tabellen. Eine Tabelle entspricht einem sog. Entitytyp (Gegenstandstyp). Jede Tabelle ist ihrerseits in Spalten und Zeilen aufgebaut. Die Zeilen stellen dabei einzelne Entities (Gegenstände) in der realen Welt dar, die Spalten geben die Attribute (Eigenschaften) des jeweiligen Objekts an. Diese Attribute werden in ihren Eigenschaften genau festgelegt entsprechend ihres Vorkommens in der Realität. So wird z.B. festgelegt, ob ein Attribut im Text-Format oder im Zahlen-Format

vorkommt und wie viele Zeichen maximal vorkommen können oder welche Zahlenformate. Die einzelnen Tabellen stehen dabei in Beziehung zueinander analog zur obigen Beschreibung des Entity-Relationship-Modells. Im Folgenden wird an dem einfachen Beispiel aus der Hydrogeologie dieser tabellarische Aufbau veranschaulicht. Die miteinander verknüpften Attribute werden hier mit Strichen verbunden. Ein Strich mit einem Pfeil am Ende bedeutet, dass die referentielle Integrität gewährleistet sein muss.

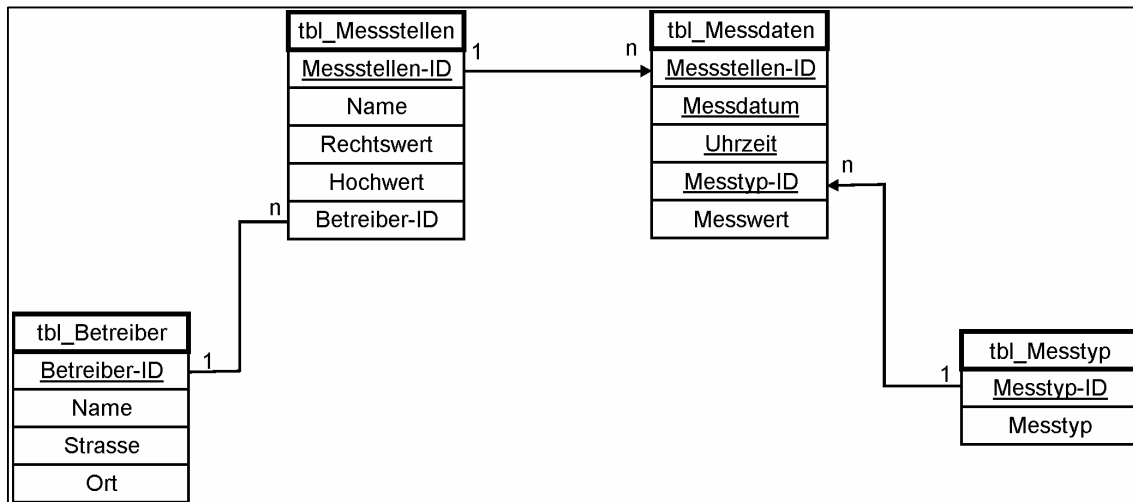


Abb. 3-3: Darstellung des Entity-Relationship-Modells in tabellarischer Form an einem einfachen hydrogeologischen Beispiel

3.2.3 Grundlagen von Datenbank-Systemen

Datenbanken beruhen auf der Beschreibung ihrer Struktur in einem bestimmten Modell mit Hilfe der Datendefinitionssprache = Data Definition Language (DDL). Diese DDL ist dabei abhängig von dem jeweiligen System, in dem die Datenbank entwickelt wird. Hiermit wird das Datenbank-Modell mit seinen Gegenständen und Beziehungen in der entsprechenden Datenbank erstellt. Dies geschieht mit Hilfe von sogenannten DDL Compilern und Interpretern, welche die konzipierten Informationen in entsprechende Systemtabellen umsetzen. Hierbei werden Merkmale der Datenbank in dem Datenkatalog gespeichert. Die Daten werden in der Datenreferenztable gespeichert, die Zugriffsbefugnistabellen regeln die entsprechenden Zugriffsbefugnisrechte.

Mit Hilfe der sogenannten Datenbankmanagementsysteme = Database Management Systems (DBMS) werden dem jeweiligen Anwenderprogramm die notwendigen Funktionen wie Lesen und Schreiben zur Verfügung gestellt. Es gewährleistet die Beibehaltung der Datenintegrität und bietet zusätzlich noch Funktionalitäten zur Datenbankwartung an. Hierbei kann es sich um Datenoptimierungsroutinen handeln oder auch um Datensicherungsfunktionen.

Ein Anwenderprogramm für den Zugriff auf eine Datenbank greift mit Hilfe einer Datenmanipulationssprache = Data Manipulation Language (DML) auf die entsprechenden Daten zu. Hiermit werden unter Berücksichtigung der entsprechenden Zugriffsbefugnisse z.B. die Funktionen des Abfragens, Erstellens, Änderns und Löschens der enthaltenen Daten bereitgestellt.

Der Zugriff auf eine Datenbank stellt einen komplexen Prozess dar, der verschiedene Teilprogramme erfordert. Zunächst wird ein Betriebssystem benötigt, um bestimmte Operationen wie z.B. den Dateizugriff oder die Dateierstellung auszuführen. Mit Hilfe des DBMS ergeben sich auf dieser Grundlage die Datenbankkonzeption, Datenbankerstellung, Datenspeicherung und Zugriffsverwaltung. An diesem Punkt kommt das Anwenderprogramm hinzu, das mit Hilfe der DML die jeweiligen Anfragen des Nutzers in Befehle umsetzt, die von einem Datenbanksystem verarbeitet werden können.

3.2.4 Datenbank - Software

Zur Erstellung einer Grundwasserdatenbank, die eine Teilkomponente des Grundwassermanagementsystems darstellt, wird eine entsprechende Datenbank-Software benötigt. Als Grundvoraussetzung für diese Anwendung muss jedoch bei dieser Software der Datenzugriff über eine Standardschnittstelle wie ODBC oder SQL möglich sein. Hier stehen eine Reihe verschiedener Systeme zur Verfügung. Denkbar wären für diese Anwendung unter anderem die Software-Produkte Oracle, dBase, MySQL, Microsoft SQL-Server, GwBase und Microsoft Access. Auch eine Eigenentwicklung mit Microsoft Visual Basic oder Microsoft Visual FoxPro auf Basis einer Access-Datenbank oder mit dBase-Tabellen wäre möglich.

Zu Beginn dieser Untersuchungen wurden die verschiedenen Systeme auf ihre Verwendungsmöglichkeiten und auf ihre Verbreitung geprüft. Dabei wurde die Option der Verwendung von GwBase sehr schnell wieder verworfen, da hier fast keine Anpassung durch den Benutzer entsprechend der Erfordernisse möglich ist. Auch die Verwendung von dBase wurde aufgrund der mittlerweile nur noch geringen Verbreitung und der Speicherung der Daten in einzelnen Dateien verworfen.

Als finale Optionen standen somit die Verwendung von Oracle, MySQL Server, Microsoft SQL-Server, Microsoft Access und eine Eigenentwicklung zur Auswahl. Die komplette Eigenentwicklung einer Software mit Hilfe von Microsoft Visual Basic mit einer Datenspeicherung z.B. in MySQL Server wurde nicht durchgeführt, da hiermit eine weitere, neue Software auf dem Markt existiert hätte, deren Einführung und Durchsetzung als sehr aufwendig angesehen wurde. Darüber hinaus können alle notwendigen Funktionen für das Grundwassermanagementsystem direkt in Microsoft Access programmiert und eingebunden werden.

Bei der Wahl zwischen den Systemen Oracle, MySQL Server, Microsoft SQL-Server und Microsoft Access kommen neben der Funktionalität noch weitere Entscheidungsgrundlagen hinzu, einmal die Verbreitung im hydrogeologischen Sektor und zweitens die Benutzerfreundlichkeit. Oracle und Microsoft SQL-Server stellen zwar für große Systeme, z.B. in der Telekommunikation, weit verbreitete Datenbanken dar, finden aber aufgrund der deutlich komplexeren Systeme und der höheren Kosten im hydrogeologischen Sektor keine große Verbreitung.

In der vorliegenden Untersuchung wurde deshalb, unter anderem aufgrund der Tatsache, dass sich Microsoft Access mittlerweile als die Standard Datenbank unter den Windows Betriebssystemen durchgesetzt hat, Microsoft Access als Grundlage für die Grundwasserdatenbank verwendet. Microsoft Access gehört zu der Gruppe der so genannten relationalen Datenbank Management Systemen (DBMS). Es wurde speziell für die Verwaltung großer Datenbestände entwickelt.

Der Aufbau der auf der Grundlage von Microsoft Access erstellten Grundwasserdatenbank wurde dabei an die entsprechenden Erfordernisse dieses lokalen Beispiels angepasst.

Man kann dabei drei funktionelle Kernbereiche der Grundwasserdatenbank unterscheiden:

- Das eigentliche DBMS, das zur Verwaltung der existierenden Daten in Form von Tabellen und Abfragen dient. Hierbei ist zur Sicherung einer redundanten Datenspeicherung auf eine korrekte Umsetzung der 3 Normalform-Regeln zu achten. Dies muss in der erstellten Grundwasserdatenbank entsprechend berücksichtigt werden.
- Die Benutzeroberfläche, die den Zugriff auf die Daten ermöglicht, jedoch einen Zugriff und ungewollte Änderungen am DBMS verwehrt. Mit dieser Benutzeroberfläche können die vorhandenen Daten eingesehen, bearbeitet, ausgewertet und z.B. in Form von Ganglinien präsentiert werden. Weiterhin wird die Ausgabe von Berichten und ermittelter Daten ermöglicht.
- Die Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) steht zur Erstellung eigener Benutzeroberflächen zur Verfügung, die von dem Programm Microsoft Access nicht mitgeliefert werden. Erst damit erfolgt eine echte Anpassung der Datenbank an die gewünschte Benutzeroberfläche mit der entsprechenden Funktionalität.

3.3 Geographische Informationssysteme (GIS)

Die Geographischen Informationssysteme (GIS) stellen einen zentralen Bestandteil eines Grundwassermanagementsystems dar. Sie können in Anlehnung an GÖPFERT (1991) als ein Informationssystem beschrieben werden, in dem raumbezogene Daten der Lithosphäre, der Erdoberfläche und der Atmosphäre in einem einheitlichen räumlichen Bezugssystem modellhaft erfasst, verarbeitet, gespeichert, analysiert, aktualisiert und aufbereitet werden.

Hierbei ist hervorzuheben, dass auch Daten auf einer zunächst rein geographischen Darstellung wie einer Topographischen Karte hinzugefügt werden können, die nur indirekt einen geographischen Bezug haben. Stellt so z.B. die Darstellung eines Flusses auf einer Topographischen Karte in einem Geographischen Informationssystem zunächst noch keinen direkten Mehrwert dar, ist es hiermit aber möglich, weitere abgespeicherte Informationen wie

z.B. Wasseranalysen oder Abflussmessungen zu dem entsprechenden Fluss direkt in die Darstellung einzublenden.

Der wesentliche Nutzen eines GIS liegt in der Möglichkeit, lagebezogene Analysen unterschiedlichster Datentypen durchzuführen und verschiedene Datentypen räumlich miteinander zu verschneiden. Diese räumliche Verschneidung stellt insbesondere in der hydrogeologischen Anwendung einen großen Nutzen dar. Hier haben fast alle relevanten Daten einen direkten Raumbezug. Außerdem lassen sich aus den gebildeten Schnittmengen auch neue raumbezogene Informationen ableiten, die zunächst der direkten Beobachtung und Analyse häufig nicht zugänglich sind.

3.3.1 Entwicklung der Geographischen Informationssysteme

Die Entwicklung der Geographischen Informationssysteme basiert in Anlehnung an BARTELME (1995) auf den Erfahrungen und der Entwicklung der Menschen im Allgemeinen. Sie beruht zunächst auf der Entwicklung der Sprache und somit der Benennung von Objekten. Diese sprachliche Entwicklung weitet sich später auf die Benennung abstrakter Begriffe aus.

In einer weiteren Entwicklungsstufe kommt es dann zur graphischen Darstellung der Umwelt. Analog zur sprachlichen Entwicklung werden später auch abstrakte Objekte wie z.B. Hoheitsbereiche oder auch geschichtliche Ereignisse graphisch dargestellt. Diese graphischen Darstellungen kann man als die ersten sogenannten **Themen** bezeichnen, die wir auch bei den heutigen Geographischen Informationssystemen verwenden. Die Themen wurden im Laufe der Zeit immer häufiger verwendet und die dargestellte Thematik immer komplexer, so dass eine immer höhere Abstraktion der realen Daten erfolgen musste. Je größer die Abstraktion ist, über umso mehr Hintergrundinformationen muss man verfügen, um die Darstellung eines entsprechenden Themas nachvollziehen zu können.

Somit sind mit dieser Entwicklung die Grundlagen der heutigen Geographischen Informationssysteme geschaffen, deren Anfänge in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurückreichen. Nach COPPOCK, J.T. & RHIND, D.W. (1991) lassen sich vier (überlappende) Entwicklungsphasen der Geographischen Informationssysteme zusammenfassen. In dem

Zeitraum zwischen 1955 und 1975 existierten hauptsächlich einzelne Individuen, die zumeist voneinander isolierte Wege verfolgten. Es mangelte vor allem an digitalen Daten und einer entsprechenden Computerunterstützung. In einer zweiten Phase zwischen 1970 und 1985 wurde vor allem auf Seiten der Behörden begonnen, die vorhandenen Geodaten in eine digitale Form zu überführen, jedoch mangelte es auch hier noch an einer entsprechenden Hard- und Softwareunterstützung für ein echtes Geographisches Informationssystem. Im Zeitraum von 1982 bis 1990 wurde dann von verschiedenen Software-Firmen Geographische Informationssystem-Software hergestellt, die aufgrund einer nun vorhandenen Hardware-Unterstützung, hier vor allem die sogenannten UNIX-Workstations, auch eine entsprechende Anwendung finden konnten. Die Zeit von 1988 an wird als die Phase der Nutzer angesehen, die die nun vorhandenen Daten mit Hilfe der Software und der entsprechenden Hardware ihrer Nutzung zuführen und immer mehr Spezialanwendungen ermöglichen. Dies wird auch sehr durch die immer größere Verbreitung der Netzwerke und der Nutzung des sogenannten World Wide Web (WWW oder Internet) forciert.

Somit stellen die Geographischen Informationssysteme nun ein sehr effektives und starkes Werkzeug für die Erfassung, Aufbereitung, Analyse, Berechnung und Ausgabe von unterschiedlichsten Parametern dar.

3.3.2 Grundlagen der Geographischen Informationssysteme (GIS)

Nach BARTELME (1995) besteht ein Informationssystem, das einem Geographischen Informationssystem zu Grunde liegt, aus Daten, die zu einer Datenbank zusammengefasst sind, und einer Reihe von Werkzeugen, die eine den Erfordernissen entsprechende Verarbeitung der Daten ermöglichen. Die vorhandenen Daten werden dabei mit Hilfe eines Datenbankmanagementsystems (DBMS), wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, zu einer Datenbank zusammengefasst. Mit Hilfe des DBMS wird eine Datenordnung, Datenschutz, Datenzugriffssteuerung und Datensicherung realisiert. Die Werkzeuge sind die eigentlichen Funktionalitäten, die ein Geographisches Informationssystem bietet. Hiermit werden z.B. Funktionalitäten zur Dateneingabe, Datenaufbereitung, Datenverschneidung, Dateninterpolation und graphischen Aufbereitung zur Verfügung gestellt.

Nach KAPPAS (2001) kann man ein Informationssystem auch aus Sicht der einzelnen Verarbeitungsschritte in die Komponenten **Erfassung**, **Verwaltung**, **Analyse** und **Präsentation** (**EVAP**-Komponenten) von Daten unterteilen. Die im englischen Sprachgebrauch verwendete Abkürzung **IMAP**-components mit den Komponenten **I**nput, **M**anagement, **A**nalysis and **P**resentation ist allerdings häufiger zu finden.

Dabei ist zu beachten, dass ein Geographisches Informationssystem kein in sich abgeschlossenes System darstellt, sondern dass speziell eine entsprechende Anpassung und Zugabe gewünschter Funktionalitäten (Werkzeuge) möglich sein muss. Wichtig hierbei ist jedoch die Tatsache, dass die vorhandenen Werkzeuge genau aufeinander abgestimmt sein müssen. Zusammenfassend lässt sich in Anlehnung an BARTELME (1995) als Anforderung an ein Geographisches Informationssystem festhalten, dass alle Werkzeuge in ein gemeinsames Gesamtkonzept passen müssen, das Gesamtkonzept für eine Weiterentwicklung und entsprechende Anpassungen offen sein muss und ein kontinuierlicher Datenfluss von der Erfassung bis zur Auswertung ebenso möglich sein muss. Dies gilt auch für die Kombination von einzelnen Themen und Verbindung mit anderen Informationssystemen.

Geographische Informationssysteme zeigen im Allgemeinen einen modularen Aufbau, der sich in drei Einheiten zusammenfassen lässt, das **Datenverarbeitungs-Teilsystem** mit den Teilprozessen Datenerfassung, Dateneingabe und Datenspeicherung, das **Datenanalyse-Teilsystem** mit den Teilprozessen Datenanalyse, Abfragen und statistischen Analysen und das **Datenpräsentations-Teilsystem** mit dem Prozess der Informationsausgabe mit Hilfe von Karten und Tabellen.

Aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Anwendungen von Geographischen Informationssystemen ist jedoch eine allgemeingültige Definition sehr schwer zu formulieren und nach PARKER (1988), zitiert in KAPPAS (2001), sollte man Geographische Informationssysteme als eine Technologie und nicht nur als ein Computersystem auffassen. Damit wird auch die ständige Anpassung und Veränderung verdeutlicht.

Geographische Informationssysteme basieren grundlegend auf der Erfassung zweier unterschiedlicher Datentypen: den graphischen Daten oder Geometriedaten und den Sachdaten. So lässt sich z.B. ein Fluss in reinen Geometriedaten und entsprechenden

Sachdaten erfassen. Die räumliche Erstreckung des Flusses spiegelt sich in den Geometriedaten wider. Entsprechend vorhandene Daten wie Flussname, Gewässersystem oder Abflussmengen von Teilabschnitten stellen die zugeordneten Sachdaten des räumlichen Objekts dar.

Dabei lassen sich vorhandene Objekte entsprechend der vorliegenden Daten in unterschiedliche Dimensionskategorien unterteilen. Objekte liegen zweidimensional (2D) vor, wenn die Geometriedaten nur als X, Y - Koordinaten vorhanden sind. Eine Dreidimensionalität (3D) besteht, wenn die X, Y, Z – Koordinaten in ausreichender Dichte vorkommen. Hier lassen sich 3D-Linien-, 3D-Flächen- und 3D-Volumenmodelle unterscheiden. Die Objekte liegen vierdimensional (4D) vor, wenn zusätzlich noch ein Zeitparameter existiert.

Die vorhandenen räumlichen Objekttypen lassen sich in ihrer topologischen Dimension in Null-, Eins-, Zwei- und Dreizellen untergliedern. Nullzellen werden durch Punkte oder Knoten repräsentiert, Einszellen durch Linien oder Kanten, Zweizellen durch geschlossene Linienpolygone bzw. Flächen, während Dreizellen einfache dreidimensionale Merkmale darstellen.

3.3.3 Geographische Informationssystem (GIS) – Software

Zur Erstellung eines Geographischen Informationssystems als Teilkomponente des Grundwassermanagementsystems wird eine entsprechende Geographische Informationssystem-Software benötigt. Analog zu den optionalen Datenbank-Softwares muss auch hier als Grundvoraussetzung für diese Anwendung bei dieser GIS-Software der Datenzugriff über eine Standardschnittstelle wie ODBC oder SQL möglich sein.

Mittlerweile stehen hier eine Reihe verschiedener Systeme zu Verfügung. Denkbar wären für diese Anwendung unter anderem die Software-Produkte ESRI ARC/INFO, ESRI ArcView GIS, ESRI ArcGIS, Smallworld Systems GIS und Intergraph Geomedia. Sie alle stellen die für ein Grundwassermanagementsystem notwendigen Schnittstellen ODBC oder SQL zur Verfügung. Dabei ist bei den oben genannten Software-Produkten zu beachten, dass sie teilweise für unterschiedliche Systemumgebungen programmiert wurden. Als Beispiel wurde ESRI

ARC/INFO für den Markt der Unix-Basierten Workstations programmiert. Hier wurde lange Zeit der Weg begangen, graphische und nicht-graphische Daten in unterschiedlichen Dateien abzuspeichern. Bei den nicht-graphischen Daten existierte die Möglichkeit, die Daten in einer kommerziellen Datenbank oder in dem ESRI Dateisystem INFO abzuspeichern. Zunächst wurden die graphischen Daten immer in dem ESRI Format ARC abgespeichert. Mit der Einführung der ESRI Spatial Database Engine (SDE) wurde die Möglichkeit eröffnet, die graphischen und nicht-graphischen Daten in einer kommerziellen relationalen Datenbank zu speichern. Als Optionen stehen dem Benutzer dabei die relationalen Datenbank-Produkte Informix, Oracle, Sybase und IBM DB2 zur Verfügung.

Da ein Grundgedanke für die Konzeption des Grundwassermanagementsystems die möglichst weite Verfügbarkeit des Systems darstellt, wurden nur die Software-Systeme, die auf einer Microsoft Windows-Systemumgebung lauffähig sind, in die engere Wahl einbezogen.

Eine Lauffähigkeit auf der Windows-Systemumgebung sichert die Anwendung im sogenannten täglichen Gebrauch, da sich mittlerweile Windows als das Standard Betriebssystem bei den meisten Nutzern durchgesetzt hat. Hier stehen bei deutlich geringeren Kosten mittlerweile PC-Systeme zur Verfügung, die den Anforderungen eines großen Grundwassermanagementsystems problemlos gewachsen sind. Somit wurden im Zuge dieser Untersuchungen nur die Windows-Basierten Software-Produkte auf ihre Eignung für ein Grundwassermanagementsystem überprüft.

Smallworld Systems GIS stellt ein Objekt - orientiertes Geographisches Informationssystem dar, das schon recht früh den Weg beschritt, graphische und nicht-graphische Daten in einem einzigen Datenbankmanagementsystem zu erfassen. Nach GÜNTHER (1998) besteht hier die Möglichkeit, die vorhandenen Daten in der Smallworld Systems Datenbank-Eigenentwicklung „Version Managed Data Store“ (VMDS) zu speichern. VDMS bietet dabei einen effizienten Ansatz für ein Versionen Management und lange Transaktionen. Auf dieses Datenbankmanagementsystem und die gespeicherten Daten kann man mit einem SQL Server oder der sogenannten API (application programming interface) zugreifen. Weiterhin ist es bei diesem System möglich, beim Aufbau einer neuen Tabelle auch eine andere Datenbank, die mit dem GIS-System verknüpft ist, als Datenspeicher anzugeben. Smallworld Systems GIS hat jedoch speziell im hydrogeologischen Sektor bisher keine weite Verbreitung gefunden.

Die auf der Windows-Systemumgebung lauffähigen Software Produkte ESRI ArcView GIS und ESRI ArcGIS stellen momentan die Geographischen Informationssysteme mit der weitesten Verbreitung speziell im geowissenschaftlichen und hydrogeologischen Sektor dar. Dies beruht wohl unter anderem darauf, dass ESRI ARC/INFO aufgrund seiner frühen Einführung ein sehr weit verbreitetes Produkt bei den geologischen Diensten darstellt und die entsprechenden Dateiformate mit ESRI ArcView GIS und ESRI ArcGIS problemlos verarbeitbar sind. So findet ESRI ArcView GIS z.B. auch beim HLOG neben der Workstation-Version ESRI ARC/INFO seinen Einsatz. Hierbei muss man mittlerweile zunächst zwischen den älteren Versionen ESRI ArcView GIS 3.x und den neueren Versionen ESRI ArcGIS 8.x/9.x unterscheiden. ESRI betreibt momentan eine duale Weiterentwicklung der Windows-basierten Software. Stellt die momentan aktuelle ESRI ArcView GIS 3.3 Version eine Weiterentwicklung der Vorgängerversionen 3.0 bis 3.2 bzw. der noch älteren Versionen 2.x oder 1.x dar, ist mit Einführung von ESRI ArcView 8.0 eine größere Systemumstellung vorgenommen worden, deren momentan aktueller Stand die Version ESRI ArcView 9.1 ist.

Das ältere System ESRI ArcView GIS 3.3 stellt dabei auch bei der Datenhaltung eine Fortführung der Vorgehensweise der älteren ESRI ArcView GIS Systeme dar, die auf den Grundlagen des ESRI ARC/INFO Systems beruhen. Hierbei werden die graphischen Attribute von Objekten in dem ESRI Shape-Dateiformat abgespeichert, während die nicht-graphischen Attribute der Objekte in dBase Datenbanktabellen gesichert werden. In der Standardkonfiguration stellt ESRI ArcView GIS 3.3 im Vergleich zu ESRI ARC/INFO eine in der Benutzerfunktionalität reduzierte Version dar. Hier werden viele Benutzerfunktionen, die bei ESRI ARC/INFO schon standardmäßig vorhanden sind, erst mit teilweise kommerziellen Zusatztools möglich. Zusätzliche Funktionen kann man mit Hilfe von sogenannten Erweiterungen (Dateiformat *.avx) hinzufügen oder auch mit der ESRI ArcView GIS eigenen Programmiersprache AVENUE selbst programmieren.

Bei der Systemumstellung auf die Software-Produktlinie ESRI ArcView 8.x wurde eine weitere Zusammenführung des ESRI ARC/INFO Systems mit dem ESRI ArcView GIS System vorgenommen. Hierbei wurden ESRI ArcView unter anderem viele Funktionalitäten des ESRI ARC/INFO Systems hinzugefügt; es wird jedoch weiterhin zwischen verschiedenen Produkt-Varianten unterschieden. ESRI ArcInfo, ESRI ArcEditor und ESRI ArcView unterscheiden sich

in ihrem Umfang und ihrer Funktionalität und dementsprechend auch im Preis. Eine größere Umstellung stellt die Möglichkeit dar, graphische und nicht-graphische Daten in einer einzigen Datenbank (z.B. Microsoft Access) zu speichern. Weiterhin wurde auch bei der integrierten Programmiersprache eine Veränderung von AVENUE zu Visual Basic vorgenommen. Diese Umstellung der systemeigenen Programmiersprache ist wohl auch ein Hauptgrund dafür, dass ESRI die Produktlinie ESRI ArcView GIS 3.x weiterentwickelt, wenn auch nicht vorrangig. Eine Übernahme der auf ESRI ArcView GIS 3.x basierenden Geographischen Informationssysteme, die mit Hilfe von AVENUE angepasst wurden, in die neue Produktlinie ESRI ArcView 8.x/9.x ist, wenn überhaupt möglich, mit einem großen Aufwand verbunden, der verständlicherweise bei den Nutzern wenig Anklang findet.

Für beide ESRI Produktlinien gibt es noch die Systemerweiterung „Spatial Analyst“ von ESRI, die speziell für die Anwendung in einem Grundwassermanagementsystem interessant ist. Hiermit werden z.B. Funktionalitäten zur Interpolation von Höhendaten oder auch anderer Daten auf ein entsprechendes Raster hinzugefügt. Dies ist für die vorliegende Anwendung speziell für die Kombination mit Grundwassermodellen von Nutzen.

Eine weitere Option bei der Nutzung eines Geographischen Informationssystems stellt das Software-Produkt Intergraph Geomedia dar. Auch hier ist die Speicherung von graphischen und nicht-graphischen Daten in kommerzielle Datenbanken wie z.B. Microsoft Access möglich. Weiterhin wird der Datenimport von anderen graphischen Dateiformaten wie z.B. Dateien im ESRI Shape Format oder auch CAD-Zeichnungen im dxf-Format ermöglicht. Intergraph Geomedia findet zur Zeit speziell im wasserwirtschaftlichen Sektor häufiger seinen Einsatz. Eine auf Intergraph Geomedia basierende Anwendung wird z.B. auch beim Umweltinformationssystem des Staatlichen Umweltamtes Gießen eingesetzt.

Für die Erstellung des Grundwassermanagementsystems in vorliegender Untersuchung wird aufgrund der weiten Verbreitung im hydrogeologischen Sektor und somit der entsprechenden Nutzer-Erfahrungen die Anwendung des ESRI ArcView GIS 3.3 Produkts zusammen mit dem Spatial Analyst verwendet. Mit dieser Kombination sind alle gewünschten Funktionen, die für eine entsprechende Anwendung im Grundwassermanagementsystem notwendig sind, vorhanden bzw. lassen sich mit Hilfe einer Programmierung in AVENUE hinzufügen.

3.4 Grundwassermodelle

3.4.1 Einleitung

Numerische Grundwassermodelle stellen eine numerische Lösung zur Beschreibung von Strömungs- und Transportprozessen im Grundwasser dar. Durch die zunehmende Nutzung oder auch die Beeinträchtigung von Grundwasservorkommen bei gleichzeitig wachsendem Bewusstsein, dass zur Vermeidung unerwünschter Auswirkungen auf das Grundwasser ein besseres Verständnis über die ablaufenden Prozesse notwendig ist, wurden in den letzten Jahrzehnten Modelle und Ansätze für die sorgfältige Beschreibung der Grundwasserströmungsverhältnisse und die Berechnung charakterisierender Einflussgrößen entwickelt (DVWK, 1985).

3.4.2 Grundlagen von numerischen Grundwassermodellen

Ein mathematisches Grundwassermodell stellt eine schematisierte Abbildung des realen Grundwassersystems dar, das auf den zugrunde liegenden Modellvorstellungen und einem Konzeptmodell basiert. Das Konzeptmodell bildet die wesentliche Grundlage für ein mathematisches Grundwassermodell, das auf der Entwicklung eines hydrogeologischen Modells basiert, auf das später näher eingegangen wird.

Die in einem Grundwassersystem ablaufenden Strömungs- und Transportprozesse werden durch mathematische Gleichungen beschrieben. Die Strömungsgleichungen lassen sich aus der Kontinuitätsgleichung und dem Gesetz von DARCY herleiten. Die Kontinuitätsgleichung fordert die Erhaltung der Masse. Das Gesetz von DARCY stellt die erste mathematische Gleichung für eine zweidimensionale Grundwasserströmung dar, auf der alle weiteren Entwicklungen aufbauen. Das Gesetz von DARCY lautet

$$\vec{v} = -k_f \cdot \Delta h$$

$$\text{mit } \vec{v} = (v_x, v_y) \text{ und } \Delta = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right).$$

Mit der fortschreitenden Entwicklung der existierenden Computersysteme wurden bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts realitätsnahe Simulationen der Grundwasserströmung mit mathematischen Grundwassermodellen ermöglicht. Dabei kann man bei mathematischen Grundwassermodellen zwischen analytischen und numerischen Verfahren unterscheiden.

Analytische Verfahren sind eine Abstraktion des vorhandenen Grundwasserströmungssystems, die auf sehr einfachen Annahmen beruhen. Dabei wird der Betrachtungsraum, der in dem Falle dem Modellgebiet entspricht, durch die Annahme von isotrop-homogenen Untergrundverhältnissen und einer unendlichen Ausdehnung des Aquifers repräsentiert. Diese Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse schränkt die Möglichkeiten der Anwendung der analytischen Verfahren naturgemäß stark ein. Es gibt jedoch auch für die analytischen Verfahren Anwendungsmöglichkeiten. Sie haben einen Vorteil. Es sind nur wenige Parameter für eine mathematische Berechnung erforderlich. Daraus resultiert ein Zeitgewinn gegenüber numerischen Verfahren. So finden sie z.B. bei der Planung und Konzeptionierung von Sanierungsbrunnen in quartären Aquiferen häufig ihre Anwendung. Die hier zumeist stattfindende Vereinfachung des Untergrundaufbaus ist jedoch zu beachten und bei der Lösung entsprechend zu bewerten. Analytische Verfahren können aber durchaus eine Grundlage für numerische Verfahren bieten, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Numerische Verfahren finden bei komplexeren Aufgabenstellungen ihre Anwendung. Solche sind schon bei einem Untergrundaufbau gegeben, der sich z.B. nicht mehr durch die Annahme eines einzigen k_f -Wertes darstellen lässt. Sie stellen für das Modellgebiet eine räumlich diskretisierte Wasserbilanz auf. Diese erweitert sich bei instationären Grundwassermodellen um eine zeitlich diskretisierte Wasserbilanz.

Grundlage aller numerischen Verfahren bildet die numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Sie beruhen auf den physikalischen Gesetzen der Volumen-, Massen- und Energiebilanz und den dazugehörigen Strömungsgesetzen und werden durch Bedingungsgleichungen vervollständigt. Dabei unterscheidet man zwischen Anfangsbedingungen, die den Zustand zum Berechnungsbeginn beschreiben und Randbedingungen, die den Systemzustand an den gewählten Rändern des Modellgebietes beschreiben.

Der Strömungsraum wird in eine endliche Anzahl von Raumelementen zerlegt, was man als Diskretisierung bezeichnet.

Die verschiedenen numerischen Verfahren unterscheiden sich vor allem durch ihre räumliche Diskretisierung. Die verbreitetsten Varianten sind die Finite-Differenzen- (FD) und die Finite-Elemente- (FE) Verfahren. Weiterhin existieren noch die Finite-Volumen- (FV) Verfahren. Sie finden jedoch unter anderem aufgrund der sehr komplexen Modellerstellung kaum eine Anwendung.

Bei den FD-Modellen erfolgt eine Diskretisierung des Modellgebietes durch rechteckige Modellzellen, deren Maße abhängig von den jeweiligen Erfordernissen spalten- und zeilenweise geändert werden können. Bei den FE-Modellen ist eine räumliche Diskretisierung des Modellgebietes mit Elementen beliebiger Form möglich. Einzige Einschränkung ist die geradlinige Verbindung zwischen den einzelnen Knotenpunkten. Auch hier sind die Maße der jeweiligen Raumelemente (Modellzellen) an die Aufgabenstellung anzupassen.

Die FD-Verfahren sind weiter verbreitet als die FE-Verfahren. Die Gründe hierfür liegen in der zumeist einfacheren Modellerstellung, den einfacheren mathematischen Grundlagen im Vergleich zu den FE-Verfahren sowie den Erstellern des „Standard-Codes“ MODFLOW für die FD-Verfahren. Die Veröffentlichung des Codes als sogenannte Freeware und das Renommee des USGS führte zu einer weltweiten Verbreitung des MODFLOW -Codes zur numerischen Lösung des FD-Differentialgleichungssystems.

Für einen **gespannten Aquifer** lässt sich die partielle Differentialgleichung wie folgt aufstellen:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R$$

Dabei sind K_x , K_y und K_z Komponenten des hydraulischen Durchlässigkeitstensors \mathbf{K} . S_s ist der spezifische Speicherkoeffizient und R ein genereller Term für die Zugabe oder Entnahme einer bestimmten Wassermenge pro Zeiteinheit. R ist positiv für die Zugabe einer Wassermenge pro Zeiteinheit zum System.

Für einen **ungespannten Aquifer** lautet die partielle Differentialgleichung wie folgt:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h^2}{\partial z} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R$$

Hierbei gilt die Annahme, dass $T_x = K_x h$ und $T_y = K_y h$ ist, mit h als wassergesättigte Aquifermächtigkeit. S_y steht für specific yield und entspricht der effektiven Porosität. Die Gleichung ist somit nichtlinear und lässt sich daher nicht mit den „Standard“-Lösungsmethoden lösen. Im Falle von MODFLOW wird dabei der Ansatz verfolgt, den aktuellen (bekannten) Wert der wassergesättigten Aquifermächtigkeit zu verwenden. Damit ist es möglich, die Gleichung im numerischen Modell zu linearisieren.

3.4.3 Entwicklung von numerischen Grundwassermodellen

Ausgehend von den ersten analytischen Modellberechnungen, die bereits Ende der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts durchgeführt wurden, kam es Ende der 70er und zu Beginn der 80er Jahre zu einer rasanten Entwicklung auf dem Sektor der numerischen Grundwassermodelle. Dies wurde unter anderem durch die deutlich zunehmenden Rechen- und Speicherkapazitäten bei den bestehenden Computersystemen ermöglicht.

Mit der Veröffentlichung des FEMWATER-Codes durch YEH & WARD (1979) am Oak Ridge National Laboratory stand bereits 1979 der Allgemeinheit ein Code zur Verfügung, der die Berechnung von numerischen Finiten-Elementen Modellen ermöglichte. Dieser Code basierte auf der Programmiersprache FORTRAN.

1984 entwickelten und veröffentlichten dann McDONALD & HARBAUGH (1984) im Auftrag des U.S. Geological Survey einen ersten Code für ein Programm zur Berechnung von numerischen Finite-Differenzen-Modellen. Es erhielt den Namen MODFLOW (**Mod**ular ground water **flow** model). Auch dieses Programm basiert auf der Programmiersprache FORTRAN. Der Name des Programms ergab sich aus der Tatsache, dass es sich aus mehreren Modulen zusammensetzt. Dabei lassen sich ohne weiteres neue Module anfügen. Die erste Version von MODFLOW fand zunächst noch nicht so häufig ihren Einsatz, erst mit der Veröffentlichung der neuen Version der Software (MODFLOW 88) durch McDONALD & HARBAUGH (1988) schaffte das Programm den

Durchbruch. Die Version wurde lange Zeit eingesetzt, was wohl auf das große Ansehen des U.S. Geological Survey zurückzuführen ist. Andererseits liegt den Finite-Differenzen-Modellen im Vergleich zu den Finiten-Elementen-Modellen eine deutlich einfachere Mathematik zugrunde. Außerdem spielen die Vorteile bei der Netzgenerierung im Vergleich zu den Finiten-Elementen-Modellen eine Rolle.

Allgemein war gleichwohl festzustellen, dass der Aufwand für die Generierung der MODFLOW- oder FEMWATER-Datensätze immens war. Aus diesem Grund kam es recht schnell zur Einführung einer sogenannten Prä- und Postprozessor Software, die den Nutzer bei der Erstellung der notwendigen Datensätze graphisch unterstützt. Diese Entwicklung erfolgte speziell mit Beginn der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts, da entsprechend der Vergrößerung des PC-Marktes und der Durchsetzung von Microsoft Windows als Quasi-Standardbetriebssystem deutlich mehr Software Firmen diesen Markt erkannten. Es wurde eine Reihe von Windows-basierten Prä- und Postprozessor Software-Produkten auf den Markt gebracht, die eine graphische Unterstützung für die Erstellung der Modell-Datensätze bieten. Dabei überwog entsprechend der deutlich größeren Verbreitung des MODFLOW-Codes im Vergleich zum FEMWATER-Code auch die Anzahl der Prä- und Postprozessor Software-Produkte für Berechnungen mit dem MODFLOW Programmcode.

Im Jahre 1996 veröffentlichten HARBAUGH & McDONALD (1996a + 1996b) erneut eine veränderte Version ihrer Software MODFLOW 96. Hier waren vor allem verschiedene neue Module und Aktualisierungen bei den Gleichungslösern hinzugekommen. Wie MODFLOW 88 verwendet auch MODFLOW 96 das sogenannte BCF-Package für den Schicht- und Grundwasserfließansatz. BCF-Package steht für **B**lock **C**entered **F**low Package und entspricht einem Konzept, das von einem Zellen-zentrierten Fließen innerhalb des Finite-Differenzen Gitters ausgeht. Dabei wurden im Laufe der Entwicklung drei verschiedene Versionen des BCF-Packages vom USGS veröffentlicht. BCF1 stellt dabei die Original-Version dar. Mit der BCF2-Version wurde die Möglichkeit der Wiederbenetzung von trockengefallenen Zellen gegeben und mit der BCF3-Version zusätzlich noch ausgefeiltere Möglichkeiten für die Berechnung der Conductance (Einheit: m^2/s) eingebaut. Die Conductance stellt dabei das Produkt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert (Einheit: m/s) mit der durchflossenen Fläche (Einheit: m^2) dar, geteilt

durch die Länge der Fließstrecke (Einheit: m). Diese wird durch die Entfernung zwischen den Zellmittelpunkten bestimmt.

Bei allen BCF-Packages wird im sogenannten „Standard MODFLOW Ansatz“ von einem Konzept ausgegangen, das numerisch nur die Grundwasserleiter explizit umsetzt. De facto müssen die für die Grundwasserleiter reservierten Zellen des Modells keinen geometrischen Kontakt zueinander besitzen. Die Geometriedaten der Modellschichtflächen kennzeichnen jedoch den Bereich des dazwischen liegenden Trennhorizontes eindeutig. Bei Vorgabe der Durchlässigkeit dieser Trennschicht in vertikaler Richtung kann der letztendlich maßgebliche hydraulische Parameter vertical conductance (VCONT – auch bekannt als vertical leakance oder Leakage Term) des Trennhorizontes modellintern berechnet werden, so dass eine Verbindung der Grundwasserstockwerke gemäß dem Leakageprinzip entsteht. Der Tiefenbereich zwischen den Grundwasserstockwerken (= hydraulische Trennschichten) zählt streng genommen nicht zum Modellraum. Dementsprechend werden für diese Zonen auch keine Grundwasserstände oder Grundwasserbilanzen berechnet. Parametrisiert werden die Trennhorizonte beim Standard MODFLOW Ansatz mit Hilfe der sogenannten Leakance (Einheit: $1/s$). Die Leakance stellt dabei den Quotient aus dem vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert und der Mächtigkeit des Trennhorizontes dar. Diese Vorgehensweise dient vor allem dazu, Modellschichten und somit Datenmengen einzusparen.

Beim Modellschichtenansatz aller drei BCF-Packages wird ausgehend vom Standard MODFLOW Ansatz zwischen folgenden vier Modellschichttypen unterschieden:

Tabelle 3-1: Modellschichttypen des MODFLOW BCF-Package

| Modell-Schichttyp | Schichtzustand gespannt/ungespannt | Benötigte Modellparameter (stationär) | Zusätzlich benötigte instationäre Modellparameter |
|-------------------|--|---|---|
| LAYCON=0 | immer gespannt (Transmissivität konstant) | Transmissivität, Leakance | Primärer Speicherkoefizient |
| LAYCON=1 | immer ungespannt (Transmissivität verändert sich, Berechnung mit gesättigter Mächtigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert) | Schichtunterkante, Durchlässigkeitsbeiwert, Leakance | Primärer Speicherkoefizient |
| LAYCON=2 | gespannt (/ungespannt) (Transmissivität konstant; Speicherkoefizient kann zwischen Primärem [gespannt] und Sekundärem [ungespannt] wechseln) | Schichtoberkante, Transmissivität, Leakance | Primärer Speicherkoefizient, Sekundärer Speicherkoefizient |
| LAYCON=3 | gespannt/ungespannt (Transmissivität verändert sich, Berechnung mit gesättigter Mächtigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert; Speicherkoefizient kann zwischen Primärem [gespannt] und Sekundärem [ungespannt] wechseln) | Schichtoberkante, Schichtunterkante, Durchlässigkeitsbeiwert, Leakance | Primärer Speicherkoefizient, Sekundärer Speicherkoefizient |

Dabei ist zu beachten, dass der primäre Speicherkoefizient für LAYCON = 0, 2 und 3 dem Speicherkoefizienten S (engl. storativity) entspricht, während er für LAYCON = 1 der nutzbaren Porosität entspricht (engl. $S_y = \text{Specific Yield}$). Der Sekundäre Speicherkoefizient entspricht stets der nutzbaren Porosität (eng. $S_y = \text{Specific Yield}$).

Mit der Einführung der Windows-basierten Prä- und Postprozessoren wurde zusätzlich der sogenannte „True Layer Approach“ für Berechnungen mit dem MODFLOW-Code erstmals verwendet. Hierbei muss für alle Modellschichten unabhängig vom Modellschichttyp (LAYCON) eine Schichtoberkante und eine Schichtunterkante vorgegeben werden. Weiterhin muss für alle Modellschichttypen eine horizontale und vertikale Durchlässigkeit vorgegeben werden. In Abhängigkeit vom Modellschichttyp sind bei einer instationären Berechnung der spezifische Speicherkoefizient (engl. $S_s = \text{Specific Storage}$) für den gespannten Fall und die nutzbare Porosität für den ungespannten Fall (engl. $S_y = \text{Specific Yield}$) anzugeben. Nach diesem Ansatz

müssen auch die Grundwasserstauer explizit simuliert werden. Die Unterschiede zwischen der Vorgehensweise beim Standard MODFLOW Ansatz und dem True Layer Approach werden in der folgenden Darstellung verdeutlicht.

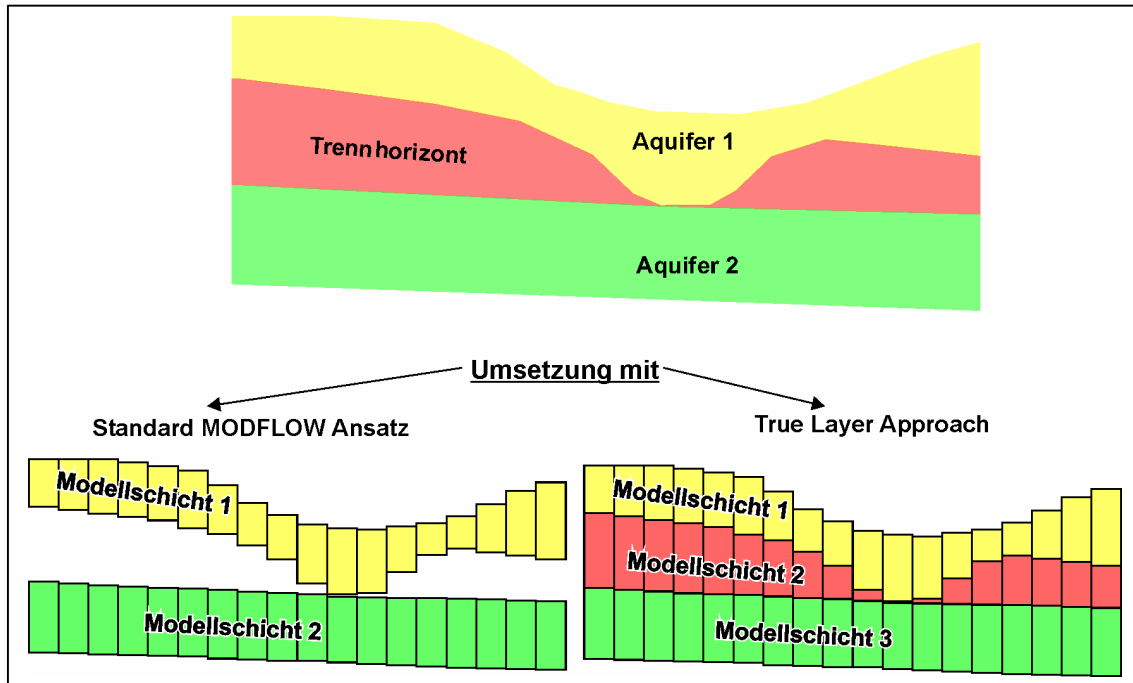


Abb. 3-4: Unterschiede im Modellschichtenansatz des Standard MODFLOW Ansatzes und des True Layer Approachs

Weiterhin unterscheidet sich bei den beiden Modellkonzepten auch die Berechnung der vertikalen Conductance (VCONT). Sie beruht auf dem unterschiedlichen Modellschichtenansatz und den unterschiedlichen Parametern, die in den Konzepten verwendet werden. Dies wird in der folgenden Darstellung verdeutlicht.

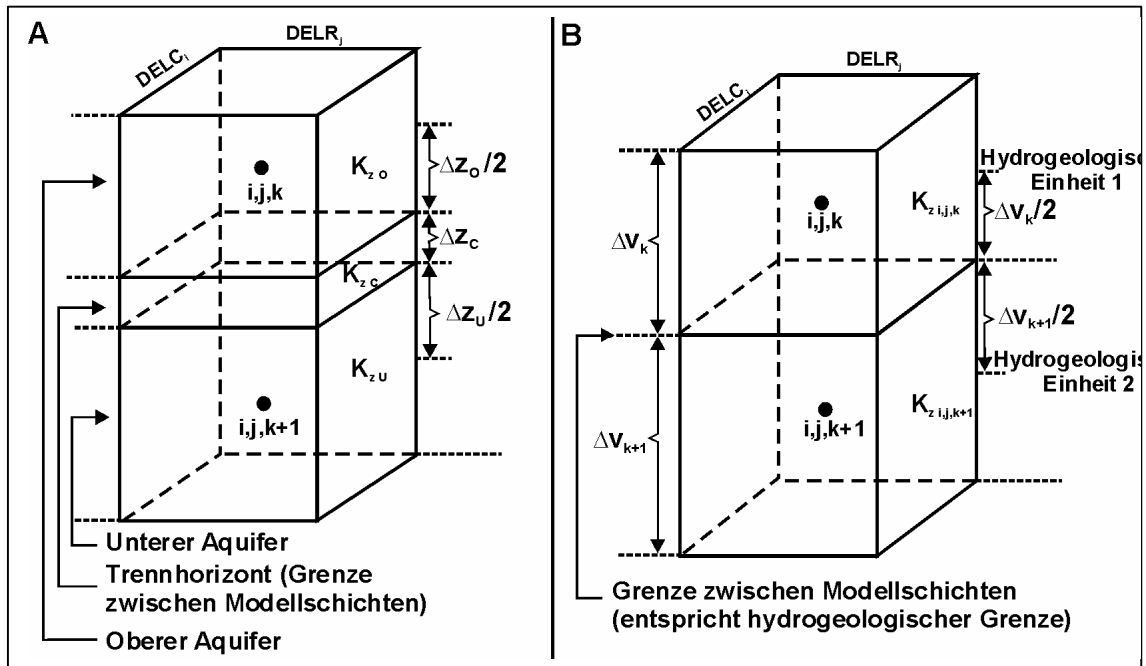


Abb. 3-5: Modellgitter-Konfigurationen für die VCONT-Berechnung mit dem Standard MODFLOW Ansatz und dem True Layer Approach nach ANDERSON & WOESSNER (1992)

In Abbildung 3-5 A wird die Modellgitter-Konfiguration für den Standard MODFLOW Ansatz gezeigt. Mit den angegebenen Parametern berechnet sich die vertikale Conductance anhand der Formel:

$$VCONT = \frac{2}{\frac{\Delta Z_O}{(K_Z)_O} + \frac{2\Delta Z_C}{(K_Z)_C} + \frac{\Delta Z_U}{(K_Z)_U}}$$

Für den Fall, dass $(K_Z)_C \ll (K_Z)_O$ und $(K_Z)_U$ ist, vereinfacht sich die Formel zu:

$$VCONT = \frac{(K_Z)_C}{\Delta Z_C}$$

Dies entspricht der Definition der Leakage und wird in den meisten Fällen für die Berechnung der vertikalen Conductance bei der Anwendung des Standard MODFLOW Ansatzes verwendet.

In Abbildung 3-5 B wird die Modellgitter-Konfiguration für den True Layer Approach gezeigt. Mit den angegebenen Parametern berechnet sich die vertikale Conductance folgendermaßen:

$$V_{\text{CONT}} = \frac{2}{\frac{\Delta V_K}{(K_Z)_{i,j,k}} + \frac{\Delta V_{K+1}}{(K_Z)_{i,j,k+1}}}$$

Im Jahre 2000 veröffentlichten HARBAUGH, BANTA, HILL & McDONALD (2000) die neue MODFLOW 2000 Version im Auftrag des USGS. Mit der Einführung von MODFLOW 2000 gab es eine Reihe von größeren Neuerungen. Zum bestehenden BCF-Package fügten sie das LPF-Package (**L**ayer **P**roperty **F**low Package) und das HUF-Package (**H**ydrogeologic **U**nit **F**low Package) für den Schicht- und Grundwasserfließansatz. Danach müssen in MODFLOW 2000 jetzt alle Schichtoberkanten und Schichtunterkanten explizit vorgegeben werden.

Das LPF-Package ähnelt dem Konzept des oben genannten „True Layer Approach“. Für alle Modellschichten müssen horizontale und vertikale Durchlässigkeiten vorgegeben werden. Analog zum oben genannten „True Layer Approach“ müssen auch hier bei einer instationären Berechnung der spezifische Speicherkoeffizient (engl. S_s = Specific Storage) für den gespannten Fall und die nutzbare Porosität für den ungespannten Fall (engl. S_y = Specific Yield) angegeben werden. Mit Hilfe der Schichtgeometrien und der Durchlässigkeiten wird die Zelle zu Zelle Conductance von MODFLOW 2000 berechnet. Eine weitere Neuerung des LPF-Packages ist die Möglichkeit der Angabe einer horizontalen Anisotropie für jede Zelle. Anstelle der Angabe einer vertikalen Durchlässigkeit lassen sich auch vertikale Anisotropiefaktoren angeben, die speziell für die Anwendung der Parameter-Abschätzung häufig verwendet werden. Mit dem Anisotropiefaktor wird die vertikale Durchlässigkeit an die horizontale Durchlässigkeit gekoppelt und die Angabe eines weiteren unabhängigen Parameters verhindert. Eine weitere Neuerung des LPF-Packages ist, dass es jetzt nur noch zwei Modellschichttypen gibt: einen immer gespannten Modellschichttyp und einen zwischen gespannt und ungespannt konvertierbaren Modellschichttyp, der dem LAYCODE = 2 und 3 aus dem BCF-Package ähnelt.

Das HUF-Package stellt eine deutlich größere Neuerung von MODFLOW 2000 dar. Es ermöglicht dem Anwender, die vertikalen Ausdehnungen einer hydrogeologischen Einheit unabhängig vom Modellgitter vorzugeben. Im BCF- und LPF-Package kann im Gegensatz dazu eine Modellzelle nur die hydrogeologischen Parameter einer hydrogeologischen Einheit erhalten. Bei Verwendung des HUF-Package muss jeder hydrogeologischen Einheit die Oberkante, die Mächtigkeit und sogenannte Materialeigenschaften zugewiesen werden. Die

benötigten und möglichen Materialeigenschaften entsprechen den Angaben für das LPF-Package. Die Unterschiede zwischen dem BCF- und LPF-Package-Ansatz und dem HUF-Package-Ansatz werden noch einmal in der folgenden Abbildung verdeutlicht. Hier wird ausgehend von einer realen hydrogeologischen Situation mit drei hydrogeologischen Einheiten die unterschiedliche Umsetzung mit dem BCF-, LPF- und HUF-Package dargestellt.

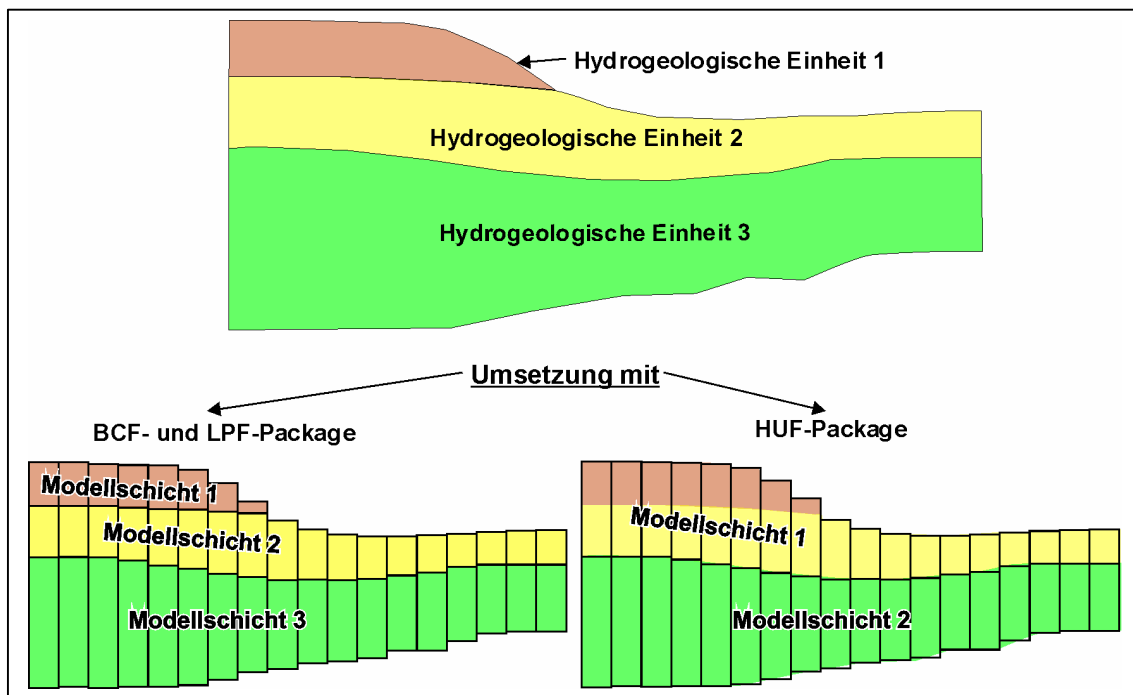


Abb. 3-6: Unterschiedliches Schichtenkonzept des BCF-, LPF- und HUF-Package

Für die numerische Umsetzung von hydraulischen Randbedingungen gibt es für MODFLOW eine Reihe von sogenannten Packages, deren Verwendung je nach Anwendung optional möglich ist. Es existieren die folgenden drei Typen von mathematischen Randbedingungen:

- **Typ 1:** Festpotential-Randbedingung (Dirichlet Bedingung) mit einem festgelegten Grundwasserdruckpotential.
- **Typ 2:** Festgelegte Fluss-Randbedingung (Neumann Bedingung) mit der Funktion einer Zufluss- oder Abfluss-Rate über die Randbedingung. Eine No-Flow-Randbedingung wird durch die Angabe einer Durchflussmenge von Null realisiert.
- **Typ 3:** Grundwasserdruckpotential abhängige Fluss-Randbedingung (Cauchy Bedingung oder gemischte Randbedingung), für die die Zufluss- oder Abfluss-Rate über

die Randbedingung aus einem gegebenen Grundwasserdruckpotential an der Randbedingung berechnet wird.

In der folgenden Tabelle werden die in MODFLOW standardmäßig vorhandenen Randbedingungen mit ihrer jeweiligen Verwendung dargestellt.

Tabelle 3-2: Randbedingungen in MODFLOW

| MODFLOW Packages (Randbedingungen) | Abkürzung in MODFLOW | Beschreibung |
|---|---------------------------------|--|
| Time Variant Specified Head | CHD | Simuliert ein Festpotential, bei der das angegebene Druckpotential mit der Zeit variieren darf. |
| Recharge | RCH | Simuliert die Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag. |
| Evapotranspiration | EVT | Simuliert den Effekt der Evapotranspiration in der ungesättigten Zone. |
| Well | WEL | Simuliert Entnahme- oder Injektions-Brunnen. Wird auch für die Simulation einer bestimmten Zu- oder Abflussrate an einem Modellrand verwendet. |
| River | RIV | Simuliert Fluss Randbedingungen. Hierbei ist ein Zu- oder Abfluss über die Randbedingung möglich. |
| Drain | DRN | Simuliert Drainage Randbedingungen. Hierbei ist nur ein Abfluss aus dem Grundwassermodell über die Randbedingung möglich. |
| General Head Boundary | GHB | Wird normalerweise für die Simulation von Seen und an potentialabhängigen Zu- oder Abfluss-Modellrändern verwendet. |
| Stream/Aquifer Interaction | STR | Simuliert den Austausch von Wasser zwischen dem Aquifer und Wasserläufen (Strömen). Beinhaltet die automatische Berechnung des Fluss-Wasserstands. |
| Horizontal Flow Barrier | HFB | Simuliert den Einfluss von horizontalen Fließbarrieren wie z.B. von Spundwänden. |

Zusätzlich hierzu finden in MODFLOW noch weitere Packages ihre Verwendung. Das „Basic Package“ ist für die Angaben zum Modellgitter, der verwendeten Zeitschritte und welche anderen Packages verwendet werden zuständig und über das „Output Control Package“ wird festgelegt, wann und welche Ergebnisse von MODFLOW ausgegeben werden. Zur numerischen Berechnung mit MODFLOW wird noch ein „Solver Package“ (Gleichungslöser) benötigt. In MODFLOW 88 existieren drei verschiedene Ansätze zur Lösung der partiellen Differentialgleichung. Mit der Einführung von MODFLOW 96 und MODFLOW 2000 kamen insgesamt noch drei zusätzliche Ansätze hinzu. In MODFLOW 88 gab es das Slice-Successive

Over Relaxation Package (SSOR1), das Strongly Implicit Procedure Package (SIP1) und das Preconditioned Conjugate Gradient Package (PCG2). Mit MODFLOW 96 wurde zusätzlich das Direct Solution Package (DE45) eingeführt und mit MODFLOW 2000 das Link Algebraic Multigrid Package (LMG) und das Geometric Multigrid Solver Package (GMG).

In der Praxis lässt sich feststellen, dass hauptsächlich das PCG2-Package und das LMG-Package Verwendung finden. Mit dem PCG2-Package steht ein sehr robuster Gleichungslöser zur Verfügung, der im Vergleich zum SSOR1- oder SIP1-Package deutlich schneller ist. Das LMG-Package bietet den momentan schnellsten Gleichungslöser, ist jedoch noch etwas anfälliger in der Stabilität im Vergleich zum PCG2-Package.

3.4.4 Anwendung von numerischen Grundwassermodellen

Die Anwendung von numerischen Grundwassermodellen weist ein großes Spektrum verschiedenster Aufgabenbereiche auf (nach DVGW 2003). Die Aufgabenbereiche reichen von der einfachen hydraulischen Abschätzung mit Hilfe von Prinzipmodellen über das Ressourcenmanagement mit Hilfe von Planungsmodellen bis zu besonderen Fragestellungen, bei denen spezielle Modellierungssoftware bzw. Module ihre Anwendung finden können.

Das Ressourcenmanagement macht den größten Teil der Anwendung von numerischen Grundwassermodellen aus. Die Planung von Wassergewinnungsanlagen (Neuanlage, Erweiterung oder Umgestaltung) bildet mit der Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebots unter quantitativen, qualitativen und ökologischen Gesichtspunkten, dem Entwurf und der Gestaltung der Wassergewinnungsanlage und eine Verwendung bei anstehenden Wasserrechtsverfahren die Grundlage des Ressourcenmanagements. Der Betrieb der Wassergewinnungsanlage und die Bewirtschaftung der Wasserressource mit dem entsprechenden Schutz der Wassergewinnung stellen eine weitere Verwendungsmöglichkeit von Grundwassermodellen dar, für die z.B. die Konzeptionierung eines ausreichenden Wasserschutzgebietes, die Ermittlung der Auswirkung der Wassergewinnung auf den Naturhaushalt und die Belange Dritter, die Bewertung der geplanten Eingriffe in den Wasserhaushalt, die Unterstützung bei der Planung und Durchführung von Grundwasserschutzberatungen sowie z.B. die Planung und Positionierung von

Grundwassermessstellen für Grundwassermonitoringsysteme zu nennen sind. Auch im Ressourcenmanagement ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten von Grundwassermodellen bei der Bewertung bestehender Gefährdungspotentiale und der Entwicklung von entsprechenden Abwehrmaßnahmen.

Für besondere Fragestellungen wie die Simulation geochemischer und biochemischer Reaktionen, Strömungs- und Transportvorgänge in der ungesättigten Zone, Dichteströmung und Wärmetransport sowie des Mehrphasentransports kommen spezielle Modellierungssoftware bzw. Module zum Einsatz, die für die Standard-Anwendungsfälle nicht benötigt werden, jedoch auch ihre Anwendung finden. Dabei bilden Grundwasserströmungsmodelle die Grundlage für Transportmodelle.

Die Einsatzmöglichkeiten von Grundwassermodellen unterscheiden sich auch nach der Art des Grundwasserleiters. Sie lassen sich in Porengrundwasserleitern uneingeschränkt einsetzen. Für Festgesteinsgrundwasserleiter sind die Möglichkeiten von Grundwassermodellen eingeschränkt und müssen von Fall zu Fall überprüft werden. Generell kann man sagen, dass ihre Anwendung auf Festgesteinsgrundwasserleiter vor allem auf regionale Betrachtungen - z.B. zur Grundwasserbilanzierung - beschränkt sind. Festgesteinsgrundwasserleiter sind dabei noch in Kluft- und Karstgrundwasserleiter zu unterteilen. Sie bestehen aus hydraulischer Sicht aus dem Matrix- und dem Kluftsystem. Das Kluftsystem kann durch ein Netzwerk von Einzelklüften charakterisiert werden, das vom Matrixsystem umgeben wird und über die Kluftflächen in hydraulischem Kontakt steht. Zur Modellierung eines Kluftgrundwasserleiters existieren hauptsächlich der Kluftnetzwerk-, der Doppelporositäts- und der Kontinuumsansatz. Ersterer geht von der Vorstellung aus, dass sich die Grundwasserströmung auf die Klüfte beschränkt und die Durchlässigkeit der Matrix vernachlässigbar klein ist. Für den Fall, dass die Matrix jedoch eine signifikante Durchlässigkeit besitzt, werden Doppelporositätsansätze verwendet. Diese beiden Methoden werden aufgrund des großen Diskretisierungsaufwands und zumeist mangelnder Informationen über die Kluftsysteme sehr selten angewandt. Für den Fall einer Anwendung haben FE-Verfahren einen Vorteil, da bei den FD-Verfahren nur rechtwinklige Diskretisierungen möglich sind und Kluftsysteme zumeist keine rechtwinklige Orientierung besitzen.

Der Kontinuumsansatz betrachtet den Kluftgrundwasserleiter als poröses Medium. Für ein großes Untersuchungsgebiet und im Verhältnis dazu kleinen Klüften kann man den Festgesteinsgrundwasserleiter wie einen Porengrundwasserleiter behandeln. Im Falle eines sehr kleinen Untersuchungsgebietes mit großen Klüften müssen jedoch die einzelnen Klüfte bzw. das Kluftsystem diskretisiert werden.

Für den Ansatz der Porosität kann bei Festgesteinsgrundwasserleitern zwischen einfach- und mehrfachporösen Ansätzen unterschieden werden. In den meisten Fällen wird von einem einfachporösen Ansatz ausgegangen, bei dem die hydraulische Wirkung des Matrixsystems vernachlässigt wird. Dabei wird das Kluftsystem entweder als diskretes Kluftsystem oder als Kontinuumsystem repräsentiert. Für eine Transportmodellierung sollte man den mehrfachporösen Ansatz bevorzugen, da hier die Wechselwirkung zwischen Kluftsystem und Matrix eine große Rolle spielen kann.

3.4.5 Grundwassermodellierungs – Software

Für die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells als Teilkomponente des Grundwassermanagementsystems wird eine entsprechende Software benötigt. Das Angebot hierzu ist wie bei den Geographischen Informationssystemen und Datenbankmanagementsystemen mittlerweile sehr groß geworden. Es müssen jedoch bestimmte Voraussetzungen der Datenverbindung für eine Verwendung gewährleistet sein.

Denkbar sind für diese Anwendung unter anderem die Software-Produkte: USGS MODFLOWARC, ModelGIS, Processing MODFLOW, Groundwater Vistas, Visual MODFLOW, ArgusONE, GMS und FEFLOW.

Dabei stellt **USGS MODFLOWARC** eine frei verfügbare Erweiterung des 3-dimensionalen Finite-Differenzen-Code dar, die eine Konvertierung von GIS-Daten, die im ARC/INFO-Format vorliegen, direkt in die entsprechende MODFLOW-Datenstruktur ermöglicht und auch in der umgekehrten Richtung eine Konvertierung in das ARC/INFO-Format zulässt. Aufgrund der recht geringen graphischen Unterstützung und Funktionalitäten findet dieses Programm mittlerweile nur noch eine recht geringe Verbreitung. Es bot jedoch speziell am Anfang der Entwicklung der

GIS-Systemsoftware einen ersten Ansatz in die Richtung der Kombination von Grundwassermodellen mit Geographischen Informationssystemen.

Auch **ModelGIS** stellt einen Ansatz für einen GIS-gestützten Aufbau von Finiten-Differenzen-Grundwassermodellen dar. Mit Hilfe des Moduls GWArc erfolgt eine menügesteuerte Benutzeroberfläche für die Aufbereitung von Daten und Erstellung z.B. von MODFLOW-Datensätzen innerhalb der ARC/INFO GIS Software. Aufgrund des UNIX-Workstation basierten Ansatzes ist dieses Software-Produkt keine gewünschte Option für das Grundwassermanagementsystem und wird mittlerweile auch kaum noch verwendet.

Processing MODFLOW (aktuelle Version: Processing MODFLOW 5.3) ist eine preiswerte Alternative für die Erstellung eines MODFLOW-basierten Grundwassermodells mit Hilfe einer graphischen Benutzerumgebung. Mit dem Kauf des Buchs von CHIANG & KINZELBACH (2001) für ca. 60 € erwirbt man bereits das Programm. Mit Processing MODFLOW kann man Datensätze für die Berechnung von Transportmodellen und die sogenannte Inverse Modellierung mit Hilfe von PEST oder UCODE herstellen, was bei vielen anderen Anbietern häufig weitere Kosten verursacht. Leider bietet dieses Programm keinerlei Möglichkeiten des Imports von GIS-Objekten zur Erstellung des numerischen Modells. Der Import von graphischen Objekten wie Hintergrundkarten oder DXF-Zeichnungen ist nur zur Orientierung bei der Modellerstellung innerhalb von Processing MODFLOW gedacht. Mit Processing MODFLOW Pro gibt es noch eine weitere, erheblich teurere Version, die zusätzlich einen 3D-Explorer zur Visualisierung von Modellergebnissen beinhaltet.

Groundwater Vistas (aktuelle Version: Groundwater Vistas 3.0) stellt eine weit entwickelte graphische Benutzerumgebung für 3D-Grundwassermodellierung und Transportmodellierung zur Verfügung. Es gibt noch eine um stochastische Funktionen erweiterte Version von Groundwater Vistas, in der unter anderem Monte Carlo Versionen von MODFLOW, MODPATH und MT3D enthalten sind. Eine Besonderheit von Groundwater Vistas stellt dabei die Möglichkeit der gleichzeitigen Darstellung der Aufsicht und eines Schnitts des Modelgitters dar. Auch Groundwater Vistas bietet leider nur Funktionalitäten zum Import von Hintergrundkarten und Vektorzeichnungen zur Modellerstellung innerhalb der Software an und keine gute Unterstützung der Vorbereitung der Daten innerhalb eines Geographischen

Informationssystem. Es besteht jedoch die Möglichkeit des Exports von Modellergebnissen mit ESRI ArcView Dateien.

Ähnlich verhält es sich bei dem Softwareprodukt **Visual MODFLOW** (aktuelle Version: Visual MODFLOW 4.2). Auch hier ist es möglich, Hintergrundkarten und Vektorzeichnungen zur Modellerstellung in die Benutzerumgebung zu importieren. Zusätzlich ist sowohl der Import von ESRI Shape-files als Hintergrundobjekte für die Modellerstellung möglich als auch die Ausgabe der Modellergebnisse in ESRI Shape-files. Bei Visual MODFLOW gibt es jedoch keine Möglichkeit zur Konvertierung von extern erstellten GIS-Objekten in MODFLOW-Datensätze. Dies beruht wohl auf der Tatsache, dass die Funktionalitäten zur Erstellung von MODFLOW-Datensätzen innerhalb des Software-Produkts schon sehr ausgereift sind und daher dieser Ansatz wohl als nicht notwendig erachtet wird. Visual MODFLOW hat mit dem sogenannten 3D-Explorer ein eigenes Werkzeug für die 3-dimensionale Visualisierung der Modellergebnisse. Mit Visual MODFLOW ist es möglich, Datensätze zur Transportmodellierung herzustellen und es bietet auch die sehr gut gelungene Integration der Inversen Modellierung mit Hilfe von PEST oder UCODE an. Dabei ist zu beachten, dass Visual MODFLOW eigene MODFLOW 96 und MODFLOW 2000 Versionen verwendet, da in Visual MODFLOW schon immer der sogenannte True Layer Approach verfolgt wurde mit der notwendigen Vorgabe aller Schichtgeometrien und der Angabe von horizontalen und vertikalen Durchlässigkeiten sowie der Möglichkeit der Angabe von unterschiedlichen horizontalen Durchlässigkeiten in X- und in Y-Richtung für jede Modellzelle.

Argus ONE (aktuelle Version: 4.2) ist ein sehr weit entwickeltes Werkzeug für das Prä- und Postprocessing unterschiedlicher numerischer Grundwassermodelle. Von Argus One werden alle Public Domain Modelle und auch der Export in Modell-Eigenentwicklungen unterstützt. Zu beachten ist, dass Argus ONE als einzige Grundwassermodellierungssoftware mit Hilfe der sogenannten Plug-In Extension (PIE) Technology die Möglichkeit bietet, die Benutzeroberfläche der Software den jeweiligen Bedürfnissen des Benutzers und des gewünschten Modells anzupassen. Argus ONE unterstützt bei einer vollständigen Ausrüstung mit allen Modulen, im Gegensatz zu den bisherigen Software Produkten, neben der Erstellung von Finite-Differenzen Modellen auch die Erstellung von Finite-Elemente Modellen. Die numerischen Berechnungen mit Hilfe von Finite-Elemente Modellen basieren auf dem SUTRA-Code. Weiterhin bietet es eine

gute Unterstützung der Kombination mit Geographischen Informationssystemen (z.B. ArcView) mit echtem Prä- und Postprocessing im Geographischen Informationssystem und stellt eine gute Option für die Verwendung in einem Grundwassermanagementsystem dar.

Das Software Produkt **GMS** (= Groundwater Modeling System; aktuelle Version: 6.0) - entwickelt von der Brigham Young University - stellt ebenfalls ein sehr mächtiges Werkzeug für das Prä- und Postprocessing unterschiedlicher numerischer Grundwassermodelle dar. Es bietet wie Argus ONE ebenfalls die Möglichkeit, neben den Datensätzen für die Finite-Differenzen Modelle auch die entsprechenden Datensätze zur Berechnung von Finite-Elemente Modellen herzustellen. Die numerischen Berechnungen mit Hilfe von Finite-Elemente Modellen basieren auf dem FEMWATER-Code. Bei diesem Produkt wurde schon von Beginn an die Erstellung der notwendigen Datensätze mit Hilfe von GIS-Objekten innerhalb eines sogenannten Konzept-Modells ermöglicht. In GMS findet eine weit entwickelte Integration von und Kombination mit Geographischen Informationssystemen statt (vor allem ArcView und ARC/INFO). In den neuesten Versionen werden sowohl der Datenimport aus Standard-Datenbanken wie z.B. Microsoft Access als auch fortgeschrittene Möglichkeiten der 3-dimensionalen Visualisierung angeboten.

FEFLOW (aktuelle Version: 5.3) der Firma WASY in Berlin stellt eine sehr komplexe Prä- und Postprocessing Software für numerische Grundwassermodelle dar, die die Erstellung von Datensätzen für die Berechnungen mit Finite-Elemente Modellen ermöglicht. Dabei wird bei FEFLOW - im Gegensatz zu den oben genannten Software-Produkten - ein eigenentwickelter Code für die numerischen Berechnungen verwendet. Es fehlt bei diesem Produkt daher die Möglichkeit des Datenaustauschs mit anderen Grundwassermodellsoftware-Produkten. Nach Auffassung des Autors sollte dies aber immer möglich sein. Die Funktionalitäten, die FEFLOW beim Prä- und Postprocessing bietet, sind jedoch immens und auch die Verknüpfung und Kombination mit einem Geographischen Informationssystem (hier vor allem ArcView und ARC/INFO) sind sehr weit entwickelt. Dies beruht wohl unter anderem auf der Tatsache, dass WASY eine Kooperation mit ESRI gebildet hat und als deutscher Vertreiber für ESRI Produkte fungiert. Zu beachten ist auch, dass die Benutzerumgebung für einen Windows-Benutzer sehr „gewöhnungsbedürftig“ ist, da die Benutzerumgebung von FEFLOW sehr an die früheren UNIX-Systeme erinnert und auch aus diesen entstammt.

Insgesamt gesehen sind **GMS**, **Argus ONE** und **FEFLOW** die am besten geeigneten Grundwassermodellierungs-Softwareprodukte für ein Grundwassermanagementsystem. Bei allen drei Systemen sind sehr gute Möglichkeiten der Kombination mit Geographischen Informationssystemen gegeben. Zusätzlich bieten GMS und Argus ONE die Möglichkeit zum gleichzeitigen Prä- und Postprocessing von Finite-Differenzen- und Finite-Elemente-Modellen. Im Gegensatz zu FEFLOW werden frei verfügbare Programm Codes für die numerischen Berechnungen verwendet. Bei GMS stellt die Option des Datenimports aus Standard-Datenbanken einen zusätzlichen Vorteil dar.

4 Kopplung von Grundwasserdatenbanken, GIS und Grundwassermodellen zu Grundwassermanagementsystemen

Mit der Kopplung der Komponenten Grundwasserdatenbank, Geographisches Informationssystem und Grundwassermodell zu einem Grundwassermanagementsystem werden, wie bereits zuvor festgestellt, sehr große Möglichkeiten für die Trinkwasser- und Grundwasserüberwachung sowie den Trink- und Grundwasserschutz eröffnet.

Diese Kopplung kann dabei in Abhängigkeit von den verwendeten Teilkomponenten recht unterschiedlich realisiert werden.

Für die Kopplung des Geographischen Informationssystems ESRI ArcView GIS mit einer externen Grundwasserdatenbank stehen die Datenbank-Schnittstelle ODBC und die Datenbank-Abfragesprache SQL (Structured Query Language) zur Verfügung. Über die Datenbank-Schnittstelle ist es möglich, auf alle Datenbanksysteme zuzugreifen, die einen entsprechenden ODBC-Treiber anbieten. Dies sind z.B. die wesentlichen Datenbank-Systeme wie Oracle, Microsoft Access, dBase, MySQL, Microsoft SQL-Server oder Microsoft FoxPro. ESRI ArcView ermöglicht auch den Zugriff auf die sogenannte SDE (ESRI Spatial Database Engine). Mit diesem Zugriff eröffnete ESRI ArcView GIS die Möglichkeit, die graphischen und nicht-graphischen Daten zusammen in einer kommerziellen relationalen Datenbank zu speichern. Als Optionen stehen dem Benutzer - wie bereits zuvor beschrieben - dabei die relationalen Datenbank-Produkte Informix, Oracle, Sybase und IBM DB2 zur Verfügung.

Mit Hilfe der Abfragesprache SQL, die auf der **Relationenalgebra** beruht, können mit einer sogenannten **Selektion** bestimmte Inhalte aus einer Tabelle ausgelesen werden. Gleichzeitig können Bedingungen für bestimmte Parameter vorgegeben werden, um nur eine gewünschte Auswahl von Datensätzen zu erhalten.

Mit Hilfe der **Projektion** ist es möglich, nur die gewünschten Spalten einer selektierten Tabelle der Datenbank anzuzeigen bzw. abzufragen. Die nicht benötigten bzw. gewünschten Spalten können ausgeblendet werden.

Mit Hilfe eines sogenannten **Join** können Daten aus mehreren Tabellen abgefragt werden. Die abgefragten Tabellen müssen gemeinsame Attributwerte besitzen, über die sie miteinander verknüpft sind. Hierbei handelt es sich zumeist um die Schlüsselfelder der jeweiligen Tabellen. Gleichzeitig können bei einem Join auch Daten entsprechend ihrer Eigenschaften selektiert und projiziert werden, d.h. es werden auch bei einem Join nur die gewünschten Spalten angezeigt.

Die nun abgefragten Daten lassen sich, wenn dies zuvor in der Konzeption des Datenmodells des Grundwassermanagementsystems berücksichtigt wurde, mit Hilfe von gleichen Attributen auch mit Tabellen innerhalb des Geographischen Informationssystems verknüpfen. So lassen sich z.B. die Grundwasserstände an einer bestimmten Grundwassermessstelle abfragen, wenn die verwendeten Schlüsselfelder (ID) gleich sind. Dies beruht auf den gleichen zuvor geschilderten Grundlagen der Relationenalgebra.

Mit den abgefragten Datensätzen lassen sich in ArcView GIS z.B. Grundwasserstandsganglinien (Diagramme) herstellen und die räumliche Verteilung bestimmter Parameter in Kartendarstellungen sichtbar machen. Die abgefragten Datensätze werden innerhalb von ArcView GIS nur in einer temporären Tabelle gespeichert. Echt gespeichert wird in den ArcView GIS Projekten nur die Definition der Abfrage, wenn dies vom Benutzer gewünscht wird. Die abgefragten Daten werden bei jedem Neustart des ArcView GIS Projektes neu aktualisiert mit den vorliegenden Daten. Dies gilt auch für darauf beruhende Diagramme und Kartendarstellungen.

Für den Fall, dass ArcView, ArcEditor oder ArcInfo verwendet wird, bietet sich die Möglichkeit der kompletten Datenspeicherung in einer sogenannten Geodatabase. Analog zur SDE werden die graphischen und nicht graphischen Objekte zusammen in einer kommerziellen Datenbank gespeichert. Mit diesen Produkten ist nun auch die Verwendung von Microsoft Access möglich. Für die entsprechenden Abfragen mit Hilfe der Relationenalgebra gilt das oben Genannte. Es ist nicht mehr notwendig, auf externe Daten aus einer anderen Datenbank zuzugreifen.

Die Kopplung der ArcView Komponente mit dem Grundwassermodell basiert auf dem Austausch von Daten mit Hilfe von ESRI Shape-files und ASCII-Datensätzen. In Abhängigkeit vom verwendeten Grundwassermodellierungsprogramm sind unterschiedliche Austauschmöglichkeiten gegeben. Bei einer optimalen Kopplung der beiden Komponenten z.B.

mit den Grundwassermodellierungsprogrammen GMS, Argus ONE oder FEFLOW lässt sich ein Großteil des Präprocessings innerhalb der GIS Umgebung bearbeiten, die die oben genannten Vorteile eines Geographischen Informationssystems wie z.B. die Verschneidung verschiedener Thematiken bieten. So kann die räumlich differenzierte Grundwasserneubildung infolge versickernden Niederschlags durch Verschneidung der verschiedenen räumlichen Informationen zu Böden, Geologie, Topographie, Klima und Vegetation ermittelt werden. Eine solche Aufgabe ist nur mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems lösbar.

Die Möglichkeiten beim Postprocessing bieten einen zusätzlichen Vorteil, der durch die Kopplung entsteht. Erst durch die Kombination von Modellergebnissen mit vorhandenen raumbezogenen Informationen innerhalb des Geographischen Informationssystems wird ein großer Mehrwert der Kopplung der beiden Systeme erreicht. Zum Beispiel können mit Hilfe der Verschneidung der berechneten Grundwasserstände mit einem digitalen Geländemodell (DGM) Grundwasserflurabstandskarten ermittelt werden und durch die Verschneidung mit weiteren Themenbereichen wie der ökologischen Nutzung lassen sich leicht Risikobereiche feststellen. Ein Datenaustausch kann erneut mit Hilfe von ESRI Shape-files oder auch ASCII-Datensätzen erfolgen.

Bei der Kopplung der Grundwasserdatenbank mit der Grundwassermodellierungssoftware sind die Austauschmöglichkeiten erneut abhängig von dem verwendeten Grundwassermodellierungsprogramm. Generell ist es bei allen Grundwassermodellierungsprogrammen möglich, einen Datenaustausch mit Hilfe von Text-Dateien zu erreichen. Dabei lassen sich z.B. Grundwassermessstellen anhand ihrer Rechts- und Hochwerte aus der Datenbank exportieren und in die Grundwassermodellierungssoftware importieren. Aus einer entsprechend entwickelten Grundwasserdatenbank können für die Modellerstellung viele notwendige Daten zur Erstellung der Schichtgeometrien entnommen werden. Wenn ausreichend Bohrdaten vorliegen und eine entsprechende Erfassung der Schichtdaten stattgefunden hat, ist eine Übergabe der Schichtparameter an den entsprechenden Bohrdatenpunkten in das Grundwassermodell möglich.

Ein großer Vorteil der Kopplung von Grundwasserdatenbanken mit Grundwassermodellen entsteht vor allem bei instationären Grundwassermodellen. Hierbei lassen sich z.B. die notwendigen instationären Datensätze für die entsprechenden Brunnenentnahmen aus der

Datenbank exportieren. Im Gegenzug ist es möglich, die berechneten Grundwasserstände in die Datenbank zu importieren, um sie mit den gemessenen Grundwasserständen graphisch zu vergleichen. Für den Fall, dass GMS ab der Version 4.0 als Grundwassermodellierungssoftware verwendet wird, ist sogar die Möglichkeit eines direkten Imports mit Hilfe der ODBC-Schnittstelle und eines SQL-Zugriffs auf die Grundwasserdatenbank möglich.

Die oben festgestellten Möglichkeiten einer Kopplung von Grundwasserdatenbank mit Geographischem Informationssystem und Grundwassermodellierungssoftware sind bei der Verwendung aller Standard-Datenbanksoftware-Produkte gegeben. Hier ist immer ein SQL-Zugriff über die ODBC Schnittstelle möglich. Weiterhin ist festzustellen, dass die Möglichkeiten, die sich bei der Kopplung der Teilkomponenten bieten, recht deutlich von der verwendeten Grundwassermodellierungssoftware und vom verwendeten Geographischen Informationssystem abhängen. ESRI ArcView (GIS) stellt beim Großteil der Grundwassermodellierungssoftware-Produkte das Geographische Informationssystem dar, das die größten Möglichkeiten bei der Kopplung bietet. Standardmäßig funktioniert zwar immer ein Austausch über die ASCII-Schnittstelle, jedoch bietet ein Austausch über das ESRI Shape-Format deutlich größere Möglichkeiten.

5 Queckborn/Hessen – Ein regionales Beispiel für die Entwicklung eines gekoppelten Grundwassermanagementsystems

5.1 Einführung

Das Gewinnungsgebiet Queckborn der Stadtwerke Gießen AG stellt ein geeignetes Beispiel für die Anwendung eines gekoppelten Grundwassermanagementsystems dar.

Die Erkundung und nachfolgende Erschließung des Gewinnungsgebietes fand bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts statt (GRÜNEWALD 1948). Nachdem das große Gewinnungspotential erkannt worden war, wurde im späteren „Brunnengarten“ bereits 1894 der erste Brunnen mit einer Tiefe von ca. 10 m gegraben. Dieser erreichte einen Überlauf von 7.000 m³ pro Tag (ca. 81 l/s). Von großem Vorteil war die Nähe zur stark wachsenden Stadt Gießen. Im Laufe der Jahre wurden im Bereich des Brunnengartens noch 6 Brunnen gegraben bzw. gebohrt sowie 3 Brunnen außerhalb Queckborns.

Die Erschließung ist typisch für die gesamte Entwicklung der Wassergewinnungsanlagen im Vogelsberg. Durch den ständig steigenden Wasserbedarf im stark industrialisierten und dicht besiedelten Rhein-Main-Gebiet südlich des Vogelsberges wurde die Versorgung des Rhein-Main-Gebiets durch Grundwasser aus dem Vogelsberg schon Mitte des 19. Jahrhunderts geplant und bereits 1873 wurde die erste Fernwasserleitung aus dem Vogelsberg (Wasserwerk Fischborn) zum Rhein-Main-Gebiet fertig gestellt. Zunächst fand meistens eine Erschließung der vorhandenen Quellen mit Quelfassungen statt, jedoch setzte sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts immer mehr der Bau von Schachtbrunnen durch. Innerhalb kurzer Zeit wurden neben dem Gewinnungsgebiet Fischborn die Gewinnungsgebiete Lauter, Wirtheim, Inheiden und Neuenschmidten für das Staatsbad Bad Nauheim und die Stadt Frankfurt erschlossen. Bis zum 2. Weltkrieg wurden ca. 60 Wassergewinnungsanlagen gebaut. Nach einer kurzen Ruhephase wurden durch den Wirtschaftsaufschwung in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts insgesamt 175 Wassergewinnungsanlagen errichtet, zu denen der Ausbau bestehender Anlagen wie Inheiden gehörten sowie die Neuerschließung der Gewinnungsgebiete von Wetterfeld, Orbes, Rainrod und Kohden. Aufgrund des häufigen Auftretens von qualitativen Problemen durch zunehmende Düngung in der Landwirtschaft fand

die Erschließung zumeist durch Tiefbrunnen statt. Auch in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden noch 72 Wassergewinnungsanlagen gebaut, zu denen unter anderem Gedern/Merkenfritz, Gettenbach und Kirchbracht gehören.

Aufgrund einer extrem geringen Grundwasserneubildung in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts und bei stetig steigender Wasserförderung und stark sinkender Grundwasserpotentiale traten in den Gewinnungsgebieten des Vogelsberges eine Reihe von Problemen auf, zu denen unter anderem vermehrte Geländesetzungen (auch an Häusern) und das Trockenfallen von Quellen, Feuchtbiotopen und Bächen gehörte. Aufgrund dieser Entwicklung wurde bei einer Reihe der fertig gestellten Wassergewinnungsgebiete kein Grundwasser gefördert und führte in den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts zu einer Veränderung der bestehenden Wasserpolitik. Die Berücksichtigung ökologischer Aspekte bei den bestehenden Gewinnungsgebieten des Vogelsberges steht seitdem im Vordergrund und es finden (fast) keine Neuerschließungen mehr statt. Der Bau neuer Brunnen beschränkt sich seitdem zumeist auf den Ersatz bestehender Brunnen. Für alle Wasserwerke mit überregionaler Bedeutung fand eine einheitliche Bewertung der Absenkungsbereiche und Zonen möglicher landschaftsökologischer Auswirkungen statt (AHU 1993). Daraus wurde ein Leitfaden zur umweltschonenden Wassergewinnung im Vogelsberg entwickelt (AHU 1995), der seitdem bei allen wasserrechtlichen Verfahren anzuwenden ist.

Vor diesem Hintergrund steht die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems am Beispiel von Queckborn. Grundwassermanagementsysteme stellen eine Möglichkeit dar, das vorhandene Gewinnungsgebiet zu überwachen und eventuelle Auswirkungen auf die Grundwasserstände mit den entsprechend möglichen Auswirkungen auf Feuchtbiotope und Häuser zu kontrollieren, zu dokumentieren und auf eventuelle Auswirkungen kurzfristig zu reagieren. Daher wurde ein bestmöglich entwickeltes Grundwassermanagementsystem für das Gewinnungsgebiet in Queckborn konzipiert, dessen Erstellung in den folgenden Kapiteln erläutert wird.

5.2 Grundwasserdatenbank

Die Grundwasserdatenbank für das Gewinnungsgebiet Queckborn stellt eine erweiterte Ausführung einer einfachen Grundwasserdatenbank für ein Grundwassermanagementsystem dar. Zusätzlich zu dem Gewinnungsgebiet von Queckborn wurden alle im Gebiet des erstellten numerischen Grundwassermodells relevanten Grundwasserfassungen und Grundwassermessstellen mit den bereits bekannten bzw. ermittelten Daten erfasst. Diese Daten teilen sich in Stamm- und Messdaten auf. Die Stammdaten sind vor allem aus bestehenden Gutachten, Berichten und Karten entnommen und gehören zu den Daten, die sich nur selten oder nie ändern. Im Gegensatz dazu bilden die Messdaten eine ständig wachsende Menge, die z.B. im Rahmen eines bestehenden Grundwassermonitorings anfallen. Hier wurden vor allem die gemessenen Grundwasserstände und Entnahmedaten der SWG AG und der OVAG AG berücksichtigt sowie die Entnahmedaten der relevanten Betreiber im Untersuchungsgebiet. Auch die gemessenen Grundwasserstände des HLUG sowie die Klimadaten des DWD wurden erfasst bzw. integriert.

Diese Daten werden - wie schon zuvor erläutert (Kapitel 3.2) - in einer fortschreibungsfähigen relationalen Datenbank erfasst und verwaltet. Auch hier wird im Zuge dieser Untersuchungen das relationale Datenbankmanagementsystem Microsoft Access in der Version 2000 verwendet. Die Grundwasserdatenbank wurde an die entsprechenden Erfordernisse dieses lokalen Beispiels angepasst. Das DBMS wurde in Form von Tabellen unter Beachtung einer korrekten Umsetzung der 3 Normalform Regeln erstellt zur Sicherung einer redundanten Datenspeicherung. Die Benutzeroberfläche wurde so konzipiert, dass alle vorhandenen Daten eingesehen, bearbeitet und ausgewertet werden können. Auch die Ausgabe von Berichten und ermittelten Daten wurde ermöglicht. Gleichzeitig wurde mit der Benutzeroberfläche verhindert, dass Veränderungen an der existierenden Datenstruktur vorgenommen werden. Mit Hilfe der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) wurde diese Benutzeroberfläche so angepasst, dass eine möglichst einfache Benutzerumgebung existiert, die alle für das Grundwassermanagementsystem notwendigen Funktionen zur Verfügung stellt. Es wurden unter anderem Funktionen zur Datenein- und -ausgabe und zur Erstellung von Diagrammen und Berichten programmiert.

5.2.1 Datenmodell der Grundwasserdatenbank

Die zentrale Komponente einer Grundwasserdatenbank stellt das DBMS dar. Für die Konzeption der notwendigen Tabellen und ihrer Verbindungen untereinander muss im Vergleich zur späteren eigentlichen Erstellung der Tabellen viel Arbeit investiert werden. Zunächst muss bestimmt werden, welche Daten in die Grundwasserdatenbank integriert werden sollen. Es wurde festgelegt, dass alle vorhandenen Brunnen, Quellen, Grundwassermessstellen und Abflussmessstellen mit den relevanten Daten in die Grundwasserdatenbank integriert werden. Zusätzlich einzubeziehen sind noch die vorhandenen DWD-Wetterstationen in und um das Untersuchungsgebiet sowie die Niederschlagsmessstation Brunnengarten Queckborn. Die vorhandenen Daten müssen gesammelt, geordnet und strukturiert werden. Dabei erfolgt zunächst eine Sortierung der notwendigen und vorhandenen Daten in die sogenannten Stammdaten und Bewegungsdaten. Als Stammdaten liegen die Messstellen-Informationen wie Rechtswert, Hochwert, GOK, Geologie, Ausbau usw. vor. Als Bewegungsdaten sind hauptsächlich Entnahmedaten, Grundwasserstandsdaten, Abflussmessungen, Klimadaten und Grundwasseranalysen vorhanden. Diese gesammelten Daten wurden in Form von Tabellen unter Beachtung der Normalisierungsregeln erstellt. Letztere beruhen auf der relationalen Datenbanktheorie. Hier werden insgesamt mindestens fünf Normalformen unterschieden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden jedoch nur die ersten drei Normalformen beachtet, was für diese Untersuchung ausreicht. Eine Normalisierung wird durchgeführt zur Vermeidung von Redundanz und Anomalien beim Einfügen, Löschen oder Ändern von Datensätzen. Die Normalisierung dient dem Erreichen eines übersichtlicheren Datenmodells und der Verringerung der Notwendigkeit, Relationen umzustrukturieren.

Die Definition der ersten Normalform besagt, dass Tabellen sich in der ersten Normalform befinden, wenn alle Attribute (Felder) elementar (atomar) sind. In der zweiten Normalform wird die erste Normalform vorausgesetzt und darüber hinaus muss jedes Nichtschlüsselattribut voll funktionell abhängig von allen anderen Schlüsselattributen sein. Zusätzlich hierzu fordert die dritte Normalform, dass alle Nichtschlüsselattribute voneinander unabhängig sind.

Insgesamt ergaben sich 26 Tabellen. Mit Hilfe des Entity-Relationship-Modells wurden die Beziehungen zwischen den einzelnen Tabellen definiert. In Anlage 1 ist das Datenmodell der Datenbank im Detail dokumentiert.

Im Folgenden wird kurz der Inhalt der erstellten Tabellen zusammengefasst.

Die Tabelle der Messstellen stellt sozusagen die Haupttabelle der Grundwasserdatenbank dar, in der die Stammdaten aller Messstellen jeglicher Art enthalten sind. In dazugehörigen Untertabellen werden Angaben zum Beispiel zu den Messdaten, Filterkiesstrecken, der Ringraumabdichtungen, der Geologie, der vorhandenen Schichten, Angaben zur Geohydraulik, zu den Messpunkthöhen, zu den Analysedaten, Bildern des Messstellen-Ausbaus und Bildern des Messstellen-Schichtenverzeichnisses aufgenommen. Die vorhandenen Messtypen, Messstellentypen, Abdichtungsmaterial, die Betreiber, die Einheiten, die Flussgebiete, die Gesteine, die Gesteinseigenschaften, die Gewinnungsgebiete, die Grundwassertypen, die Grundwasserleitereigenschaften, Analyse-Messwert Klassifikation sowie die Parameterkodierung nach dem GRUWAH Schlüssel des HLUK sind in weiteren Untertabellen eingetragen.

Insgesamt baut sich die Grundwasserdatenbank aus einer komplexen Tabellenstruktur auf, deren einzelne Eigenschaften hier im Detail nicht dargestellt werden sollen.

Mit dieser geschaffenen Datengrundlage besteht nun die Möglichkeit, alle für ein Grundwasser-Managementsystem notwendigen Daten im Hinblick auf die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells zu sammeln und zu integrieren.

5.2.2 Programmierung der Benutzeroberfläche

Für die Bedienung der Datenbank-Komponente des Grundwasser-Managementsystems wurden mit Hilfe von Microsoft Access Formulare zur Ein- und Ausgabe der Daten programmiert, welche eine übersichtliche Handhabung der Datenbank und eine sichere Benutzerführung gewährleisten und die zusätzlich mit einer speziellen Menüleiste ausgestattet wurden.

Die Formulare sind für die Kommunikation mit dem Anwender die wichtigsten Objekte der Datenbank. Sie werden einerseits für die Eingabe von Daten benötigt, andererseits werden sie

zur Präsentation der Daten in Form von Listen, Graphiken oder Berechnungen eingesetzt. Zusammengefasst dienen sie zum Verwalten, Suchen und Selektieren von Daten.

Als Ausgangspunkt für die Bedienung der Datenbank wurde ein sog. Hauptformular erstellt, welches beim Programmstart automatisch aufgerufen wird. Von diesem Fenster aus können alle Datenkategorien und auch die Datenbankverwaltung angesteuert werden.

Bei den Unterformularen werden dabei aufgrund der unterschiedlichen vorhandenen Daten je nach Datenkategorie Formulare mit unterschiedlichem Inhalt erstellt. Allen gemeinsam ist ein Navigationsfenster, das eine schnelle Suche von Messstellen und eine entsprechende Navigation aufgrund ihres Betreibers und ihres Gewinnungsgebietes erlaubt.

5.2.3 Programmierung von Funktionen zur Datenein- und -ausgabe, Auswertung und Analyse

Nach dem Aufbau des Datenmodells und der Erstellung von Formularen wurden mit Hilfe der in Microsoft Access implementierten Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) Prozeduren und Funktionen zur Datenein- und -ausgabe, Datenauswertung und Analyse programmiert.

Diese Funktionen überprüfen unter anderem die Eingabe von Daten durch den Anwender auf ihre Gültigkeit, berechnen Statistiken und erstellen Diagramme und Berichte.

Der Programmcode ist dabei nur für den Datenbank-Administrator zugänglich. Hiermit wird verhindert, dass ein Benutzer ungewollt etwas an den vorhandenen Funktionen ändert und damit die Funktionalität des Systems einschränkt.

5.2.4 Erstellung von Berichtsformularen, automatisierte Berichtserstellung

Für jede Datenkategorie der Datenbank-Komponente des GWMS wurden spezielle Berichte programmiert, welche die Daten (bei Messdaten für einen bestimmten Zeitraum) ausgeben bzw.

zusammenfassen. Sie werden über spezielle Befehlsschaltflächen in den Formularen aufgerufen und erscheinen zunächst zur Kontrolle in einer Seitenvoransicht, bevor sie auf einem Drucker ausgegeben werden können. Dabei ist es die Aufgabe von Berichten, Daten aus den vorhandenen Tabellen in optisch ansprechender Form auf Papier zu bringen. Sie stellen für die Anwendung des Grundwassermanagementsystems zur Erstellung der wasserwirtschaftlichen Jahresberichte ein sehr schnelles und einfaches Werkzeug dar. Auch können problemlos bei einer entsprechenden Anfrage die vorhandenen Grundwasserstands-Daten an einer Grundwassermessstelle dokumentiert werden.

5.3 Geographisches Informationssystem (GIS)

Am Gewinnungsgebiet Queckborn wird exemplarisch die Erstellung eines Geographischen Informationssystems für ein Grundwassermanagementsystem dargestellt.

Verwendet wurde die Geographische Informationssystem Software ESRI ArcView GIS 3.3 mit der Systemerweiterung Spatial Analyst 2.0a. Sie bietet alle Möglichkeiten, die für die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems notwendig sind. Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, wären hier durchaus auch andere Software Produkte denkbar gewesen, jedoch stand diese Software dem Autor zur Verfügung und sie gehört bei den Geographischen Informationssystemen auf Windows Basis zu den Standardprodukten.

Ausgehend von dem ersten konzeptuellen hydrogeologischen Modell war festzustellen, dass das Untersuchungsgebiet nicht nur auf die nähere Umgebung des Gewinnungsgebietes Queckborn begrenzt werden konnte. Das Untersuchungsgebiet musste aufbauend auf diesem ersten konzeptuellen hydrogeologischen Modell und dem darin enthaltenen Grundwasserstockwerksbau auf den Bereich des gesamten westlichen Vogelsberges ausgeweitet werden.

Für die Teilkomponente Geographisches Informationssystem des Grundwassermanagementsystems waren alle relevanten Daten und Informationen innerhalb des Untersuchungsgebietes zu sammeln, aufzubereiten und, falls noch nicht vorhanden, in digitale Form zu überführen. Im Anschluss daran erfolgten innerhalb des Geographischen

Informationssystem eine Aufbereitung und Verschneidung der vorhandenen Daten sowie notwendige Berechnungen. Diese Datensammlung und Aufbereitung erfolgt immer unter den Aspekten der Modellerstellung sowie dem gegebenen Rahmen des Gewinnungsgebietes. Hier ist vor allem die Ökologie als ein stark bestimmender Faktor im Untersuchungsgebiet zu nennen. Im Gebiet des Vogelsberges bestehen bereits seit Jahren die Auflagen einer ökologischen Trinkwassergewinnung. Dies wirkt sich auch im Gewinnungsgebiet Queckborn mit den entsprechenden ökologischen Untersuchungen aus.

Aufbauend auf der nun folgenden Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenverschneidung ließ sich feststellen, dass das erste konzeptuelle Hydrogeologische Modell korrekt war. Somit war es möglich, das numerische Grundwassermodell hierauf aufzubauen.

5.3.1 Datenerfassung und Datenaufbereitung

Die **Erfassung der raumbezogenen Informationen** (Raumdaten) für das Grundwassermanagementsystem erfolgt in einem darauf abgestimmten **Geographischen Informationssystem** (GIS-Komponente des GWMS). Ziel ist die **Umsetzung aller relevanten hydrogeologischen, wasserwirtschaftlichen und landschaftsökologischen raumbezogenen Informationen** für das Untersuchungsgebiet Westlicher Vogelsberg und für das Gewinnungsgebiet Queckborn in digitaler Form.

Diese Daten beruhen auf analogem Kartenmaterial, Veröffentlichungen, vorhandenen Gutachtenergebnissen sowie digitalen Daten des HLOG und des Landesvermessungsamtes. Für die Einbringung der geometrischen Lageinformationen in das Geographische Informationssystem wurde eine sogenannte Sekundärdatenerfassung und eine Datenübertragung durchgeführt. Unter einer Sekundärdatenerfassung versteht man eine digitale Konversion von in analoger Form vorliegenden Dokumenten wie Karten, Plänen und Gutachten. Eine Datenübertragung wurde vorgenommen, wenn bereits Daten in digitaler Form vorlagen. War das notwendige Format nicht gegeben, musste der Datentransfer mit Hilfe eines Datenfilters geschehen. Dies betraf z.B. die Daten zum digitalen Geländemodell des Landesvermessungsamtes. Eine sogenannte Primärdatenerfassung wurde nicht durchgeführt.

Dies würde eigenen Kartierungen im Gelände entsprechen, die nicht für notwendig erachtet wurden.

Ein großer Teil der zu erfassenden Daten lag dabei in analoger Form vor (z.B. in gutachterlichen Untersuchungsergebnissen) und musste daher mit einer Digitalisierung der raumbezogenen Daten in das Geographische Informationssystem überführt werden. Dies geschah nach dem vorgegebenen Datenmodell entweder mit dem Digitalisier-Modul von *ArcView GIS (Digitizer Extension)*, dem Golden Software Produkt *Didger* oder bei Punktoobjekten häufig in tabellarischer Eingabe in Excel. Für die weitere Verwendung musste dann mit dem Import von Text-Dateien und bei Vorhandensein entsprechender Rechts- und Hochwerte eine Überführung in das ESRI Shape-Format durchgeführt werden. Bei der Digitalisierung wurden die zu unterscheidenden Objektklassen gebildet und diesen ihre im Rahmen der Aufgabenstellung relevanten Eigenschaften (Attribute) zugeordnet. In Abhängigkeit von der jeweiligen Thematik wurden teilweise Karten und Bilder auch nur in das digitale Rasterformat überführt, ohne weitere Eigenschaften zuzuordnen.

Folgende Objektklassen wurden in das Geographische Informationssystem integriert:

- Geologische Karte
- Tektonische Störungen
- Topographische Karte
- Bodenkarte
- Karte der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe)
- Basaltbasis
- Digitales Geländemodell
- Abflussbilanz des HLUG im Zeitraum 1961 bis 1990
- Jahresniederschläge
- Grundwasserneubildungsspenden nach MATTHESS (1970)
- Grundwasserneubildungsspenden nach HLFB (1997)
- Abflussmesspunkte von MATTHESS (1970) und HLFB (1997)
- Einzugsgebiete nach MATTHESS (1970)
- Zonen hoher Grundwasserneubildung nach MATTHESS (1970)
- Waldflächen
- DWD-Stationen

- Bohrpunkte
- Grundwassermessstellen
- Brunnen
- Wasserschutzgebiete
- Gewässer mit Trockenfallstrecken
- Ökologische Untersuchungen im Gewinnungsgebiet Queckborn

Ein Teil der oben genannten Objektklassen basieren auch bereits auf aufbereiteten Daten. Ein Beispiel stellen die Abflussmesspunkte von MATTHESS (1970) und HLFB (1997) dar, die so als Kartenmaterial noch nicht existent waren.

Alle als relevant eingestuft Rauminformationen wurden somit in das Geographische Informationssystem überführt.

5.3.2 Datenverschneidung und Berechnungen

Mit den nun in das Geographische Informationssystem integrierten Daten konnten alle für die Erstellung des numerischen Grundwassermodells notwendigen Analysen und Verschneidungen der vorhandenen Daten durchgeführt werden. Beispielsweise wurden unter anderem mit Hilfe der Grundwasserstandsmessungen aus 1994 in HLFB (1997) an den darin vorhandenen Grundwasserstandsmessstellen und weiteren Grundwasserstandsmessstellen und Brunnen die Grundwasserpotentialflächen für die drei Grundwasserstockwerke gebildet.

Aus den vorhandenen Daten wurden eine Reihe von neuen Objektklassen gebildet und in das Geographische Informationssystem integriert bzw. für die Übergabe in das numerische Grundwassermodell vorbereitet.

Im Wesentlichen handelt es sich um folgende Objektklassen, die in das Geographische Informationssystem integriert wurden:

- Grundwasserpotentialflächen
- Grundwasserneubildung aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell
- Grundwassermodellgebiet mit hydraulischen Randbedingungen

- Numerisches Grundwassermodellgitter
- Grundwasserflurabstandskarten

Mit den nun integrierten Daten lassen sich eine Vielzahl von Analysen durchführen, die hier im Detail nicht dokumentiert werden können.

5.3.3 Programmierung

Für die Bedienung der GIS-Komponente innerhalb des Grundwassermanagementsystems und für die Analyse (Berechnung/Auswertung) der raumbezogenen Daten werden ergänzend zu den verfügbaren *ArcView*-Funktionen mit Hilfe der in *ArcView GIS* implementierten objektorientierten Programmiersprache AVENUE zusätzliche Funktionen programmiert, welche die für das GWMS relevanten GIS-Operationen (Verschneidungen, raumbezogene Abfragen) vereinfachen und standardisieren. Durch die dadurch festgelegte Methodik bleiben die Ergebnisse vergleichbar. Die programmierten Funktionen sind dem Anwender dabei nicht direkt zugänglich, können jedoch von einem erfahrenen GIS-Bearbeiter problemlos aufgerufen werden. Dies wurde bewusst so vorgenommen, um ergänzende Programmierarbeiten bzw. Änderungen an den bestehenden Funktionen nachträglich jederzeit durchführen zu können.

Datenzugriffe auf die Grundwasserdatenbank, z.B. zur Erstellung von Grundwasserstandsganglinien, werden mit Hilfe der Datenbank-Abfragesprache SQL (Structured Query Language) realisiert. In der Datenbank vorhandene Daten werden mit Hilfe von SQL abgefragt und ESRI *ArcView* z.B. für die Erstellung von Diagrammen und thematischen Karten zur Verfügung gestellt. Die gefundenen Daten werden in eine *ArcView*-Tabelle eingelesen und können gegebenenfalls mit den Attributdaten der GIS-Objekte verknüpft werden. So erhalten beispielsweise Messdaten an Grundwassermessstellen durch Überführung in die GIS-Komponente einen Raumbezug und können für die Berechnung von Grundwassergleichenplänen und Grundwasserflurabstandskarten verwendet werden. Eine echte Datenspeicherung erfolgt nur in der Datenbank, in ESRI *ArcView* werden nur die Definitionen der Abfragen und Darstellungen gespeichert.

Bei ESRI ArcView GIS existiert auch die Möglichkeit, vorhandene programmierte Funktionen durch ein systemeigenes Kodierungsverfahren verschlüsseln zu lassen. Dies ist jedoch nach Auffassung des Autors nicht zweckmäßig, da spätere Anpassungen des Geographischen Informationssystems zumindest sehr erschwert, wenn nicht sogar verhindert werden. Diese Problematik verschärft sich zusätzlich für den Fall, dass der Systemprogrammierer nicht mehr zur Verfügung steht. Dies alles widerspricht nach Auffassung des Autors dem offenen Prinzip eines Grundwassermanagementsystems, das immer an neue Erfordernisse anpassbar sein muss und nicht zu restriktiv sein darf.

5.3.4 Anpassung der Benutzeroberfläche

Die Anpassung der Benutzeroberfläche erfolgt durch Einrichtung spezieller Menüs und Schaltflächen. Nach dem ESRI ArcView Prinzip wird beim „Überfahren“ einer Schaltfläche eine kurze Beschreibung der jeweiligen Funktion eingeblendet. Standard-Funktionen von ESRI *ArcView GIS*, die für das Grundwassermanagementsystem nicht relevant sind, wurden aus der Benutzeroberfläche entfernt, um die Übersichtlichkeit und Funktionalität für den Standardanwender so einfach wie möglich zu gestalten.

Mit Hilfe der *ArcView*-Erweiterung *Dialog Designer* wurden zusätzliche Dialogfenster zur Unterstützung des Anwenders programmiert. Hierbei können z.B. Attributdaten bequem aktualisiert oder Grundwasserflurabstandskarten einfach erstellt werden.

Auch bei den zusätzlich programmierten Dialogfenstern existiert bei ESRI ArcView GIS die Möglichkeit, den zugrunde liegenden Programmcode durch das systemeigene Kodierungsverfahren verschlüsseln zu lassen. Entsprechend der oben genannten Angaben widerspricht dies jedoch der Auffassung des Autors, ein offenes Prinzip eines Grundwassermanagementsystems zu gewährleisten.

5.3.5 Entwurf von Layout-Dokumenten

Für die Präsentation der im Geographischen Informationssystem vorhandenen Daten wurden in ESRI *ArcView GIS* spezielle sogenannte Layout-Dokumente erstellt. Mit diesen Kartenblatt-Vorlagen kann die Kartenerstellung weitgehend automatisiert werden. Diese Funktion wurde z.B. für das Berichtswesen vorgesehen. Dies ist vor allem wichtig für die Wasserversorger, wie hier die Stadtwerke Gießen AG, die zur Abgabe von Jahresberichten verpflichtet sind. Mit den Möglichkeiten des Grundwassermanagementsystems und den darin vorgesehenen Kartenblatt-Vorlagen können in diesem speziellen Fall auch Statusberichte zur Ökologie problemlos und Kosten sparend erstellt werden.

Nachträgliche Anpassungen der entsprechenden Vorlagen sind problemlos möglich und es können vom Anwender auch neue Vorlagen definiert werden. Die bereits erstellten Karten können durch Auswahl einer neuen Vorlage verändert werden.

5.4 Grundwassermodell

Das numerische Grundwassermodell stellt einen wesentlichen Teil eines kompletten Grundwassermanagementsystems dar. Mit einem kalibrierten Grundwassermodell, das auf einem guten hydrogeologischen Modell basiert, lassen sich aus den vorhandenen punktuellen Daten - wie z.B. Grundwassermessstellen, Brunnenentnahmen und Abflussdaten - räumliche Aussagen über die Verteilung der Druckpotentiale, Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse treffen. Für die Wasserwirtschaft besonders interessant sind z.B. kurzfristig mögliche Aussagen über die Auswirkung von Entnahmeveränderungen, zeitliche und räumliche Auswirkungen von Schadensfällen in Einzugsgebieten und die aus ökologischer Sicht interessanten Aspekte einer verminderten Grundwasserneubildung oder erhöhten Grundwasserförderung auf den Abfluss in den relevanten Vorflutern oder auf Quellabflüsse.

Vor diesem Hintergrund wurde ein numerisches Grundwassermodell für das Gewinnungsgebiet von Queckborn erstellt, um entsprechende Fragestellungen in diesem Gebiet klären zu können.

5.4.1 Hydrogeologische Übersicht

5.4.1.1 Datengrundlage

Das Grundwassermodell für das Gewinnungsgebiet von Queckborn/Hessen basiert auf einer Reihe von Datengrundlagen, die im Folgenden genannt werden.

- Topographische und geologische Karten von Hessen im Maßstab 1 : 25.000 und 1 : 50.000
- Klimadaten (Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte) des DWD
- Digitale Höhendaten des Untersuchungsgebietes vom Hessischen Landesvermessungsamt
- Entnahme- und GwStanddaten der relevanten Betreiber
- Vorhandene Bohrprofile und Ausbaupläne
- Grundwasserneubildungsspenden von MATTHESS(1970) und HLFB (1997)
- Bohrdaten von LEßMANN ET AL. (2001) und dem HLUG

5.4.1.2 Geographischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet liegt im westlichen Teil des Vogelsberges, der mit seinen ca. 2.300 km² Fläche zu einem der größten zusammenhängenden Vulkangebiete auf dem europäischen Festland gehört. Dabei nimmt das bearbeitete Arbeitsgebiet eine Fläche von rund 1.450 km² ein.

Die höchsten Erhebungen des in Form eines Schildvulkans erscheinenden Vogelsberges stellen der Taufstein (774 m ü.NN), der Hoherodskopf (764 m ü.NN) und der Sieben Ahorn (753 m ü.NN) dar.

Der Vogelsberg lässt sich nach der Naturräumlichen Gliederung von KLAUSING (1988) in verschiedene Haupteinheiten unterteilen, die sich wiederum in verschiedene Untereinheiten gliedern lassen. Die Haupteinheiten des Vogelsberges im Bereich des Arbeitsgebietes sind die Folgenden: Hoher Vogelsberg, Unterer Vogelsberg, Vorderer Vogelsberg und Wetterau.

Typisch für den Vogelsberg ist sein radialstrahliges Entwässerungssystem, das durch eine oberirdische Hauptwasserscheide zwischen Rhein- und Wesergebiet unterteilt wird.

Der Vogelsberg ist ein land- und forstwirtschaftlich geprägter Naturraum. Die land- und forstwirtschaftliche Nutzung lässt sich dabei recht gut nach der Höhe und den damit verbundenen klimatischen Verhältnissen gliedern. Im Bereich des Oberwalds und der langgezogenen Bergrücken zwischen den Flussläufen findet vor allem eine forstwirtschaftliche Nutzung statt, die nur selten durch eine Grünland Nutzung unterbrochen wird. Mit abnehmender Höhe nimmt dann vor allem die Grünland-Nutzung zu. Erst in den ebenen Flächen unterhalb von ca. 250 m ü.NN überwiegt eine ackerbauliche Nutzung. Dies ist vor allem in der Wetterau ausgeprägt. Bei der forstwirtschaftlichen Nutzung prägen Buchenwald und Buchen-Mischwald die Situation, die jedoch vor allem in den Privatwäldern bereichsweise durch eine Nadelwald-Nutzung ersetzt wurde.

5.4.1.3 Klima und Grundwasserneubildung

Das Untersuchungsgebiet weist deutliche Unterschiede in seinen klimatischen Bedingungen auf. Die Wetterau gehört mit einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhe von teilweise < 550 mm pro Jahr zu einem der niederschlagsärmsten Gebiete Hessens, während der Hohe Vogelsberg mit einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhe von teilweise > 1200 mm pro Jahr zu einem der niederschlagsreichsten Gebiete Hessens gehört. In den Isohyeten ist eine deutliche Auswölbung in nordwestlicher Richtung zu erkennen, die die Hauptwetterrichtung widerspiegelt. Durch die zunehmende Höhe und das dadurch abnehmende Kondensationsniveau wird ein Abregnen hervorgerufen. Auch bei der durchschnittlichen jährlichen Verteilung der Niederschläge sind Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Regionen des Vogelsberges zu erkennen. Während im Hohen Vogelsberg die Winterniederschläge überwiegen, jedoch auch im Sommer deutliche Niederschläge zu messen sind, haben die Niederungen ihr Niederschlagsmaximum im Sommer. Die Gebiete dazwischen stellen Mischtypen zwischen diesen beiden Endgliedern dar. Die jährliche Niederschlagshöhe weist im Hohen Vogelsberg eine große Amplitude auf, wie sich an der Station Herchenhain im

Messzeitraum 1960 – 1994 zeigen lässt. Sie schwankt zwischen 1620 mm/a im Jahr 1965 und 680 mm/a im Jahr 1976.

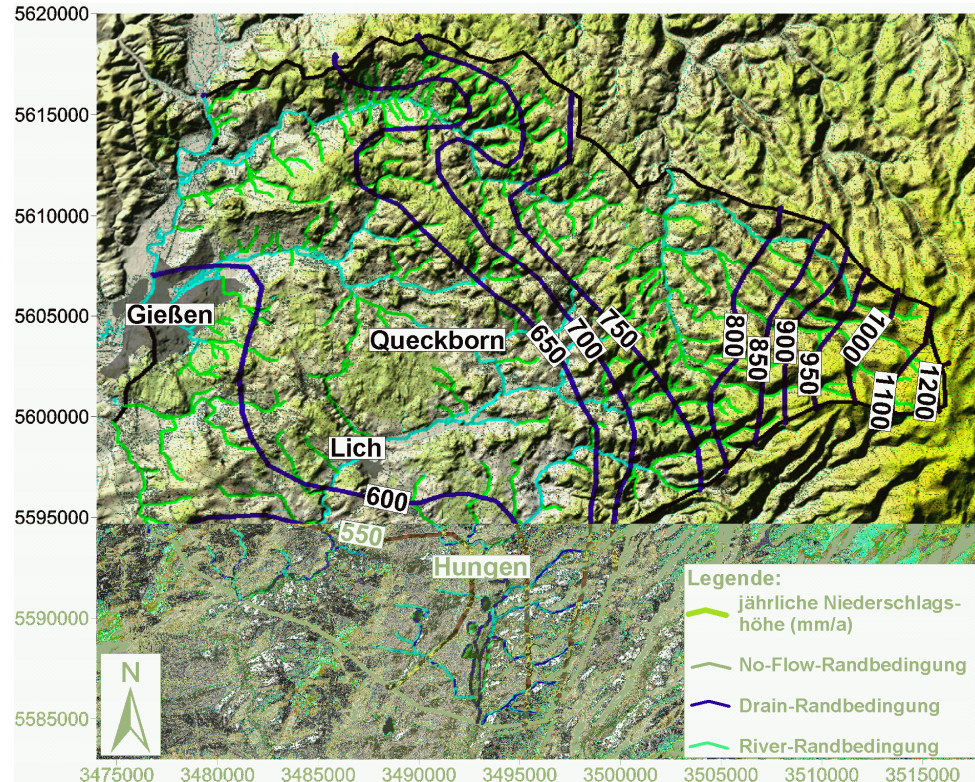


Abb. 5-1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in mm/a; Periode: 1891 – 1955, aus Klima von Hessen (1981 - 1985)

Für das Untersuchungsgebiet wurde im Rahmen dieser Untersuchungen ein Mittelwert von 645 mm/a ermittelt. Dieser Wert ist aufgrund des recht kleinen Teilausschnittes im Hohen Vogelsberg deutlich niedriger im Vergleich zu dem in LEBMANN (1999) angegebenen Mittelwert von 770 mm/a.

Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 6°C im Hohen Vogelsberg und 9°C in der Wetterau.

Da das Gelände, insbesondere im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Bereich des Unteren Vogelsberges), eine recht starke Morphologie aufweist, ist die Bilanzkomponente des oberirdischen Abflusses als ein wesentlicher Faktor für die Grundwasserneubildung anzusehen. Dabei ist eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in Anlehnung an die Naturräumliche

Gliederung nach KLAUSING (1988) in die Teilbereiche Hoher Vogelsberg, Unterer Vogelsberg, Vorderer Vogelsberg und Wetterau zu erwarten. Im Oberwald-Bereich des Hohen Vogelsberges und in der Wetterau finden sehr geringe oberirdische Abflüsse statt und im westlichen Hohen Vogelsberg und im Unteren Vogelsberg dagegen aufgrund der starken Morphologie recht hohe oberirdische Abflüsse. Im Gebiet des Vorderen Vogelsberges liegen die oberirdischen Abflüsse im mittleren Bereich.

Von MATTHESS (1970) wurden mit Abflussmessungen im Herbst 1962 erstmals für das Gebiet des vulkanischen Vogelsberges eine mittlere Niedrigwasserspense von $3,5 \text{ l/s*km}^2$ bestimmt. Kleinräumig zeigen sich jedoch sehr große Abweichungen von diesem Wert. Der ermittelte Wertebereich liegt zwischen 0 l/s*km^2 und $> 20 \text{ l/s*km}^2$.

Eine Differenzierung der Grundwasserneubildung aufgrund der Niederschlagsverteilung und der hydrogeologischen Verhältnisse zwischen dem Hohen Vogelsberg und den Randbereichen des Vogelsberges wird von WIEGAND (1977) erwartet. Er gibt einen mittleren jährlichen Grundwasserabfluss von $5,5 \text{ l/s*km}^2$ an.

Von LEBMANN (1999) wird aufgrund einer weiteren Abflussmesskampagne im Herbst 1994 eine mittlere Grundwasserneubildungsspense von $4,5 \text{ l/s*km}^2$, unter Berücksichtigung der aus dem Gebiet abgeleiteten $76 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$, angegeben. Dies entspricht einer mittleren Grundwasserneubildungshöhe von ca. 142 mm/a .

Aufgrund der Angaben in der Literatur ist insgesamt von einer mittleren Grundwasserneubildungsspense von $4,5 \text{ l/s*km}^2$ bzw. einer mittleren Grundwasserneubildungshöhe von ca. 142 mm/a auszugehen. Dies entspricht einem Anteil von ca. 22% am durchschnittlichen Jahresniederschlag im Untersuchungsgebiet.

Weitere Informationen zur Grundwasserneubildung aus Niederschlag werden im Zuge dieser Arbeit mit den Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt auf der Grundlage von gemessenen Niederschlags- und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ermittelt.

Wegen der von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlichen Werte bildeten diese Berechnungen einen wichtigen Baustein des instationären Grundwassermodells.

5.4.1.4 Geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet wird hauptsächlich von vulkanischen Gesteinen aufgebaut. Es handelt sich vor allem um alkaliolivinbasaltische und basanitische Magmentypen, die für einen Intraplatten-Vulkanismus typisch sind. Sie entstehen durch ein partielles Aufschmelzen des Oberen Mantels durch Wärmezufuhr und/oder durch Dekompression. Als Ursache für den Vogelsberg - Vulkanismus, der zur zentraleuropäischen Vulkanprovinz (CEVP) gehört, wird ein Upwelling im Oberen Mantel gesehen, das unterhalb von kontinentaler Kruste zu Wärmestauwirkungen führt. Dieser Mantel-Plume bewirkt ein Ausdünnen der Lithosphäre, was sich in einem 200 bis 300 km breiten Gürtel vom Rhone-Graben über den Rhein-Graben bis zur Nordsee verfolgen lässt. In Deutschland gehören die Gebiete von Eifel, Hegau, Hessischer Senke, Kaiserstuhl, Rhön, Siebengebirge und Westerwald zur CEVP.

Anhand von stratigraphischen Untersuchungen an Sporen konnte die Förderung der vulkanischen Gesteine auf den Zeitraum vom Aquitan bis zum Torton festgelegt werden (STEGEMANN 1964). K/Ar-Datierungen an den Vulkaniten ergeben Gesamtgesteinsalter zwischen 19 und 9,6 Mio. Jahren, wobei die Hauptförderung zwischen 17 und 15 Mio. Jahren stattgefunden haben soll (EHRENBERG & HICKETHIER 1985).

Diese Hauptförderung verläuft fast zeitgleich mit einer der Hauptphasen der alpidischen Orogenese, mit der sie von WEDEPOHL ET AL. (1994) in Zusammenhang gebracht wird. Durch die Kollision der adriatischen und der eurasischen Platte kam es auch in Mitteleuropa zu veränderten Spannungsfeldern, die durch eine Reaktivierung bestehender Störungssysteme den Aufstieg von Magma förderten.

Das Fördermaterial kommt im Untersuchungsgebiet vorwiegend in Form von übereinanderliegenden Lavaergüssen vor. Einzelne Basalergüsse lassen sich aufgrund ihrer starken Mächtigkeitsschwankungen, wechselnden petrographischen Zusammensetzung und makroskopischer Ausbildung nicht über größere Strecken verfolgen (EHRENBERG ET AL. 1981). Die tholeitischen Basalte und Olivin-Basalte stellen ein zumeist feinkörniges Gestein dar, das an den Ober- und Unterseiten der einzelnen Basaltströme ausgesprochen blasenreich ist. Im Gegensatz dazu sind die Alkali-Olivin-Basalte kompakte, blasenfreie Gesteine (außer bei Schlacken).

Zu Beginn der Förderung kommt es vor allem zur Bildung von Trachyten. Sie lassen sich jedoch auch innerhalb der basaltischen Laven nachweisen (EHRENBERG ET AL. 1981). Es handelt sich vorwiegend um gebleichte, mürbe Gesteine, die häufig stark kaolinitisiert sind.

Die Pyroklastika im Untersuchungsgebiet werden vorwiegend von alkalibasaltischen Tuffen gebildet, die eine deutliche Schichtung aufweisen. Sie sind durch die Eigenhitze verschweißt und zusätzlich durch Zeolithe, Karbonate und Montmorillonit zementiert.

Über die Form und Entstehung der Basaltbasis gibt es im Verlaufe der Erforschungsgeschichte des Vogelsberges eine Reihe unterschiedlicher Theorien, die sich vor allem mit Beginn der intensiven geologischen Erkundung des Vogelsberges zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelten. Noch bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts wurde zunächst eine Horststruktur (Triassische Hochscholle) unterhalb des Vogelsberges bevorzugt, die unter anderem von SCHOTTLER (z.B. 1937) und SCHENK (1968) vertreten wurde. WIEGAND (1977) weicht dann von dieser Vorstellung völlig ab und postuliert ein stufenförmiges Absinken der Basaltbasis vom Rand zum Zentrum hin an tangential streichenden Störungen, das nur durch vereinzelte Hochschollen gestört sei. Diese Theorie wird dann von EHRENBERG & HICKETHIER (1985) aufgegriffen und durch eine Auswertung aller vorhandenen Bohrdaten und Kartierungen weiterentwickelt. Sie erstellen aus den vorhandenen Daten eine räumliche Darstellung von Niveauschollen, die einen deutlichen Schollenbau erkennen lässt und durch erzgebirgisch und herzynische Strukturen geprägt wird. Das tiefste Niveau wird dabei in einer erzgebirgisch streichenden Scholle unterhalb des zentralen Vogelsberg erreicht, die als Hungen-Schotten-Tiefscholle bezeichnet wird (siehe Abbildungen 5-2 u. 5-3 sowie Anlage 3.6). Nach geophysikalischen Untersuchungen kann man vermuten, dass die Basaltmächtigkeit im zentralen Vogelsberg zwischen 800 und 1000 m beträgt. Bei der Bohrung Rainrod I wurde die bisher tiefste nachgewiesene Basaltbasis bei 127 m unter NN angetroffen.

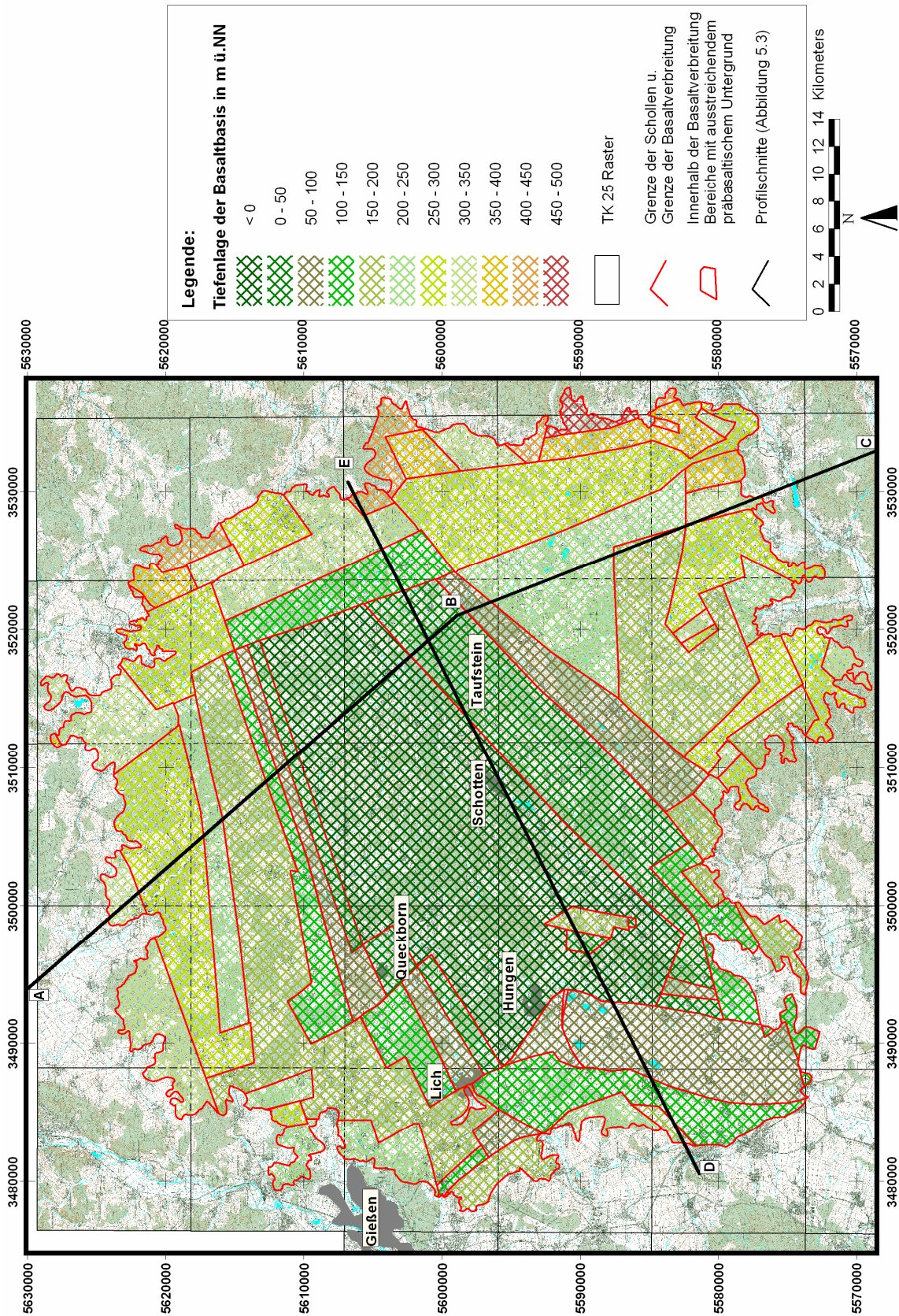


Abb. 5-2: Die Basaltbasis im Vogelsberg (verändert nach EHRENBURG & HICKETHIER, 1985)

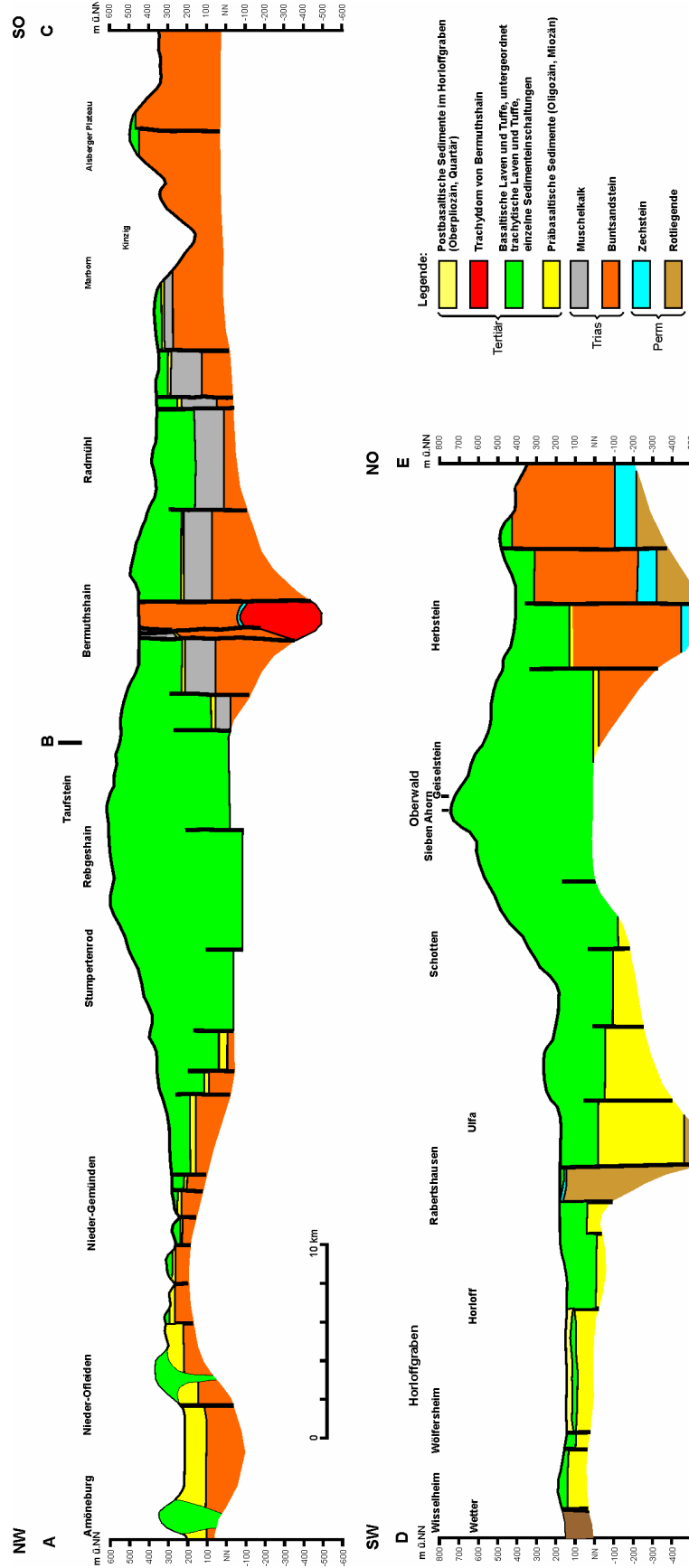


Abb. 5-3: Die Basaltbasis im Vogelsberg – Profilschnitte durch den Vogelsberg (nach EHRENBURG & HICKETHIER, 1985)

Präbasaltische Ablagerungen sind im vulkanischen Vogelsberg nur in den Randbereichen und in einigen wenigen Hochschollen innerhalb des basaltischen Verbreitungsgebietes aufgeschlossen oder in Bohrungen nachzuweisen.

Im westlichen Bereich sind dies vorwiegend paläozoische Gesteine wie devonische Schiefer, Sandsteine und Kalke und karbonische Grauwacken. In den nordwestlichen Bereichen sind permische Ablagerungen (Zechstein und Rotliegendes) und Buntsandstein aufgeschlossen. Die paläozoischen und mesozoischen Gesteine werden häufig von tertiären Sedimenten überdeckt.

In den östlichen Bereichen kommen vorwiegend Buntsandstein und Muschelkalk vor, die auch hier in Teilbereichen von tertiären Sedimenten überdeckt sind.

Die bei Bermuthshain innerhalb des Basaltverbreitungsgebietes aufgeschlossenen mesozoischen Ablagerungen (Buntsandstein und Muschelkalk) stellen nach EHRENBERG & HICKETHIER (1985) eine Hochscholle dar, die durch eine Trachyt-Intrusion entstanden ist. Bei Bad Salzhausen und Rabertshausen existiert eine weitere Scholle innerhalb des Basaltverbreitungsgebietes, die hier von Gesteinen des Rotliegendes aufgebaut wird. Gesteine des Keuper und des Lias finden sich innerhalb des Lauterbacher Grabens.

Die tertiären Sedimente beginnen im Bereich des Vogelsberges mit Süßwasserablagerungen im Unter-Oligozän, die teilweise von brackischen Ablagerungen des Melanientons (Unter-Oligozän) überlagert werden. Im Mittel-Oligozän werden unter marinen Bedingungen der Rupelton und der Obere Meeressand sedimentiert. Vom Ober-Oligozän bis in das Unter-Miozän findet eine Ablagerung der Cerithien-, Corbicula- und Hydrobien-Schichten statt.

Der Horloffgraben stellt innerhalb des Gebietes eine Besonderheit dar, da hier an manchen Stellen direkt oberpliozäne Sedimente präbasaltisches Sediment überlagern. Hier fand nach EHRENBERG & HICKETHIER (1985) eine voroberpliozäne Hebung des Gebiets statt, die zu einer teilweisen oder sogar vollständigen Erosion der basaltischen Ablagerungen führte. Der Hebung folgte ab dem Oberpliozän eine Absenkung. Dadurch entstanden teilweise mächtige oberpliozäne und quartäre Ablagerungen.

Bereits während der Basaltförderung kommt es aufgrund des tropischen bis subtropischen Klimas zu einer intensiven physikalischen, chemischen und biologischen Verwitterung der Basalte. Hierbei bilden sich Ferralsole (Roterden) und Basalteisensteine. Die Ferralsole sind

das Produkt einer miozänen Bodenbildung und stellen alte Landoberflächen dar. Durch die intensive Verwitterung der Basalte findet eine Verarmung an Silizium statt bei gleichzeitiger Anreicherung von Eisen, Aluminiumoxid, Kaolinit und Al-Chlorit. Innerhalb der Roterden finden sich im Gebiet des Vogelsberges häufig bis zu faustgroße Bauxitknollen, die überwiegend aus Gibbsit bestehen. Bei den Basalteisensteinen kommt es unter tropischen-humiden Verwitterungsbedingungen zu einer Eisen-Auslaugung des unterlagernden Basalts. Die mit Eisen angereicherte Lösung steigt kapillar auf, wird in den oberen verwitterten Bereichen des Basalts konzentriert und fällt vorwiegend in Form von Goethit aus.

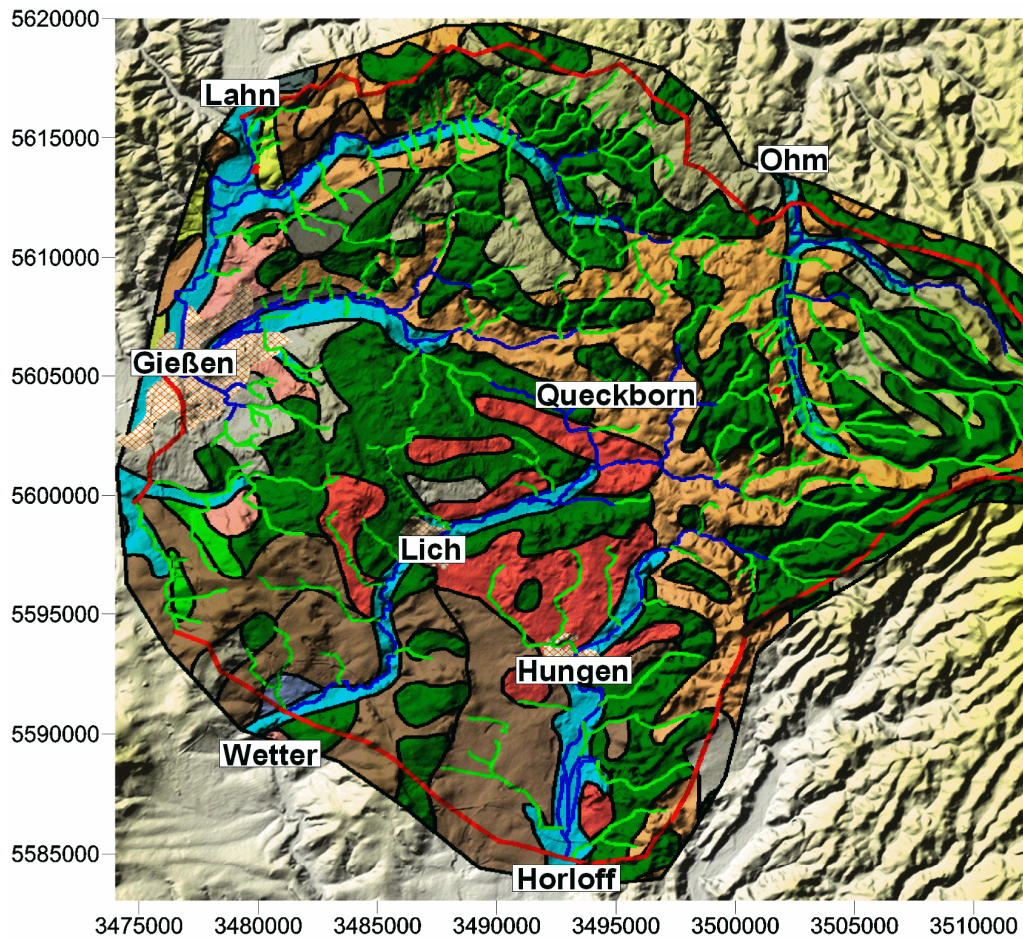
Aufgrund der klimatischen Bedingungen im Gebiet des Vogelsberges fand die Bildung von zumeist geringmächtigen, langgestreckten Braunkohlenflözen statt, die mehr oder weniger im gesamten Gebiet vorkommen und im Horloffgraben ihre Hauptverbreitung haben.

Während des Pleistozäns kommt es durch Frostverwitterung zur Bildung von Basaltschutt und Fließerden sowie zur Ablagerung von Flussterrassenschottern. In weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes wird Löß abgelagert, der vor allem in den Lee-Bereichen von Bergücken recht hohe Mächtigkeiten erreichen kann und später zum Teil in Lößlehm umgewandelt oder durch holozäne Bodenbildung überprägt wird (SCHRICKE ET AL. 1975).

Bei der räumlichen Verteilung der vorhandenen Bodentypen im Untersuchungsgebiet lässt sich recht gut eine Einteilung in verschiedene Gebiete vornehmen. In den Talbereichen der Hauptvorfluter Lahn, Lumda, Wieseck, Ohm, Wetter und Horloff kommen zumeist Auenböden, Gleye und örtlich Anmoorgleye vor. Im Hohen Vogelsberg sind vor allem Ranker-Braunerden, Regosol-Braunerden, Braunerden mit hohem Basengehalt, Parabraunerden mit mittlerem Basengehalt, Pseudogley-Parabraunerden, Pseudogley-Braunerden, Pseudogleye sowie im obersten Bereich auch Lockerbraunerden mit geringem Basengehalt zu finden. Im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes sind vor allem Parabraunerden mit mittlerem Basengehalt, mit örtlich Pseudogley-Parabraunerden sowie Ranker-Braunerden, Regosol-Braunerden und Braunerden mit hohem Basengehalt anzutreffen. Im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes existiert die größte Vielfalt an Bodentypen. Hier sind Pseudogley-Braunerden, Pseudogley-Parabraunerden, Pseudogleye, Pseudogleye mit Übergängen zu Stagnogleyen, Braunerden mit Bändern, Bänder-Parabraunerden mit geringem Basengehalt, Podsol-Braunerden mit geringem Basengehalt, Braunerden mit geringem Basengehalt, Braunerden und Pelosole mit hohem und

mittlerem Basengehalt, Braunerden mit geringem und mittlerem Basengehalt zu finden. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind vor allem Parabraunerden mit hohem und mittlerem Basengehalt, Tschernoseme und Pseudogley-Parabraunerden anzutreffen. Weiterhin kommen noch Ranker-Braunerden, Regosol-Braunerden, Braunerden mit hohem Basengehalt, Pseudogley-Braunerden, Pseudogley-Parabraunerden, Pseudogley und als Besonderheiten Rotplastosole, Braunplastosole, örtl. Latosole, Pararendzina sowie Rendzina vor.

Unter Verwendung der Bodenkundlichen Kartieranleitung lassen sich aus den vorhandenen Bodentypen Werte für die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe) ermitteln. Sie bewegt sich zwischen 140 mm und 220 mm.



Legende:

- No-Flow-Randbedingung
- Drain-Randbedingung
- River-Randbedingung

Böden mit geringer Entwicklungstiefe aus carbonatischen bzw. sulfatischen Substrat

- 1 Pararendzina, Rendzina

Böden mit geringer bis mittlerer Entwicklungstiefe

- 2 Ranker-, Regosol-Braunerden, Braunerden mit h. B.
- 3 Braunerden und Pelosole mit h. u. m. B.
- 4 Braunerden mit g. u. m. B., Pseudogleye, vereinzelt Podsol-Braunerden
- 6 Lockerbraunerden mit g. B.
- 7 Podsol-Braunerden mit g. B., stellenweise Podsole
- 9 Braunerden mit Bändern, Bänder-Braunerden mit g. B., örtl. Podsol-Braunerden
- 10 Braunerden mit g. B., Pseudogley-Parabraunerden, örtl. Podsole

Böden mit mittlerer bis großer Entwicklungstiefe

- 12 Parabraunerden mit h. B., Tschernoseme
- 13 Parabraunerden mit m. B., örtl. Pseudogley-Parabraunerden

Abb. 5-4: Die Böden im Untersuchungsgebiet (nach Bodenübersichtskarte von Hessen M 1 : 300.000, 1989)

5.4.1.5 Grundwasserleiter, Grundwasserhemmer

Die vorhandenen Gesteine bzw. Gesteinseinheiten im Untersuchungsgebiet haben sehr unterschiedliche geohydraulische Eigenschaften.

Die paläozoischen und mesozoischen Gesteinseinheiten unterhalb der Basalte sind als Grundwasserleiter zu beschreiben. In diesen Gesteinseinheiten findet z.B. nach HÖLTING (1977) - ausgehend von den Salzlagern in Osthessen - ein Grundwasserabstrom von salzhaltigem Grundwasser in südwestliche Richtung unterhalb des Vogelsberges statt. Jedoch ist von einem sehr geringen Grundwasserumsatz auszugehen.

Die tertiären Sedimente unterhalb der Basalte sind als ein weiterer Grundwasserleiter zu bezeichnen. In Abhängigkeit von ihrer Ausprägung ist jedoch auch immer wieder von teilweise recht mächtigen Grundwasserhemmern (z.B. Melaninton u. Rupelton) auszugehen.

Die Basalte stellen den Hauptgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet dar. Sie besitzen aufgrund von teilweise sehr unterschiedlichen lithologischen und strukturellen Ausprägungen unterschiedliche geohydraulische Eigenschaften. Die massigen und kluftarmen Partien sind als Grundwasserhemmer anzusehen, wogegen die gut geklüfteten Varianten gute Grundwasserleiter darstellen.

Die innerhalb der vulkanischen Einheiten vorkommenden Tuffhorizonte sind als Grundwasserhemmer zu bezeichnen. Aufgrund der Wechsellagerung von Basalten und Tuffen kommt es innerhalb des Untersuchungsgebietes zur Ausbildung mehrerer übereinander liegender Grundwasserstockwerke. Die Tuffe stellen zumeist den Trennhorizont zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken dar.

Zwischen den Grundwasserleitern unterhalb der Basalte und dem Basalt-Hauptgrundwasserleiter existiert keine hydraulische Verbindung. Dies zeigt sich zum einen in Potentialdifferenzen zwischen den Grundwasserleitern und auch in deutlichen Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung der Wässer. Eine Ausnahme davon bildet das Gebiet um Bad Salzhausen, wo Mineralwässer entlang von Störungen bis in den Basalt aufsteigen. Dies lässt sich jedoch gut durch die tektonische Sonderstellung dieses Gebietes erklären (Rotliegend-Hochscholle).

Die hydraulische Trennung wird hauptsächlich durch einen weit verbreiteten, mehrere Meter mächtigen Tuffhorizont an der Basis der Basalte hervorgerufen, der den Grundwasserhemmer zwischen diesen Grundwasserleitern bildet.

Die pliozänen Sedimente über den Basalten im Horloffgraben sowie die quartären Talfüllungen stellen einen Porengrundwasserleiter dar. Aufgrund des Anteils der Feinfraktion innerhalb dieser Sedimente kann dabei die Durchlässigkeit stark schwanken, so dass sie auch als Grundwasserhemmer ausgebildet sein können. Die hydraulische Verbindung zum Basalt-Hauptgrundwasserstockwerk ist davon abhängig, ob ein entsprechender Trennhorizont ausgebildet ist oder nicht. Im allgemeinen wird von einer hydraulischen Verbindung zwischen den beiden Grundwasserleitern ausgegangen, jedoch sind auch Bereiche bekannt, in denen sich innerhalb der Talfüllungen eigene Grundwasserstockwerke bilden.

5.4.1.6 Grundwasserpotentialschwankungen, Grundwasserströmungsverhältnisse

Das Untersuchungsgebiet stellt aufgrund der vielen Grundwassererschließungsmaßnahmen ein Gebiet mit einer vergleichsweise sehr guten Grundwassermessstellendichte und vielen Brunnen dar. Daher lassen sich besonders mit den Daten der OVAG, des HLUG und der SWG AG langjährige Trends in den Grundwasserpotentialschwankungen feststellen und ein vergleichsweise gut abgesichertes Bild für die vorhandenen Grundwasserströmungsverhältnisse im Hinblick auf das hydrogeologische Modell (HGM) erstellen.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes gibt es aufgrund des teilweise sehr komplexen Aufbaus mit einem häufigen Wechsel von Grundwasserleitern und Grundwasserhemmern, wie schon in Kapitel 5.4.1.5 beschrieben, kleinräumig deutliche Unterschiede in den Grundwasserpotentialschwankungen.

Nach den vorliegenden Daten kann das Untersuchungsgebiet in drei Hauptgrundwasserstockwerke innerhalb des Basaltes eingeteilt werden. Innerhalb des obersten Grundwasserstockwerks existieren auch schwebende Grundwasserstockwerke mit lokaler

Verbreitung, die jedoch aufgrund ihrer lokalen und nicht genau abgrenzbaren Verbreitung nicht explizit als eigene Grundwasserstockwerke berücksichtigt wurden.

Regional gesehen lässt sich vor allem feststellen, dass die Frequenz der Grundwasserpotentialschwankungen mit zunehmender Beobachtungstiefe länger wird. Dies wird durch die mit zunehmender Tiefe zumeist größer werdende Überdeckung mit Grundwasserhemmern und einer dadurch bedingten Verzögerung des Grundwasserneubildungsprozesses verursacht. Während sich im obersten Grundwasserstockwerk der Einfluss der Grundwasserneubildung kurzfristig bemerkbar macht, nimmt dieser Einfluss mit zunehmender Tiefe immer mehr ab. Stattdessen nimmt mit zunehmender Tiefe der Einfluss der langfristigen Entwicklungen zu. Während man im mittleren Grundwasserstockwerk als prägendes Merkmal den Jahresgang beobachten kann, zeigen sich im tiefsten basaltischen Grundwasserstockwerk vor allem die sehr langfristigen Trends. Hier sind z.B. die Jahre mit sehr geringer Grundwasserneubildung Mitte der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts als prägendes Element in allen Grundwasserganglinien dieses Grundwasserstockwerks zu erkennen.

Es ist festzustellen, dass sich auch der Schwankungsbetrag der Ganglinien in den unterschiedlichen Grundwasserstockwerken zumeist deutlich unterscheidet und mit zunehmender Tiefe der Grundwassermessstelle normalerweise zunimmt.

Exemplarisch werden diese Unterschiede im zeitlichen Verhalten der Grundwasserpotentiale an den nachfolgenden Grundwassermessstellen vorgestellt.

Als Beispiel für eine Grundwassermessstelle in einem schwebenden Grundwasserstockwerk innerhalb des ersten Grundwasserstockwerks kann die im Mai 1995 gebohrte „GWM BG 2“ der SWG AG angesehen werden. Sie befindet sich nördlich von Queckborn, hat eine Bohrtiefe von 5 m und einen Bohrdurchmesser von 324 mm. Die oberen 1,87 m sind mit Bentonit abgedichtet. Das Filterrohr erstreckt sich von 2,87 m bis 4,87 m u. GOK. Im Verlauf der Grundwasserstandsganglinie (Zeitraum 1999 bis 2003) kann man deutlich das Leerlaufen des schwebenden Grundwasserstockwerks erkennen, das zumeist im April/Mai eines Jahres beginnt. Im Oktober/November des jeweiligen Jahres setzt dann wieder die Phase der Speicherfüllung ein. Diese beiden Phasen (Speicherentleerung/Speicherfüllung) zeigen

deutliche zeitliche Unterschiede. Während sich die Speicherentleerung über einen Zeitraum von fast einem halben Jahr verteilt, geschieht die Speicherfüllung zumeist innerhalb weniger Wochen. Dabei stellt sich das Grundwasserpotential wieder auf den für dieses Grundwasserstockwerk mittleren Wert (ca. 212,50 m ü.NN) ein. Man erkennt während dieses Zustandes immer wieder die kurzfristigen Reaktionen auf Grundwasserneubildungsereignisse und kann auch hier häufig kurze Phasen der Speicherentleerung beobachten. Der minimale Grundwasserpotential-Schwankungsbetrag in dem beobachteten Zeitraum (5 Jahre) beträgt rund 5 m.

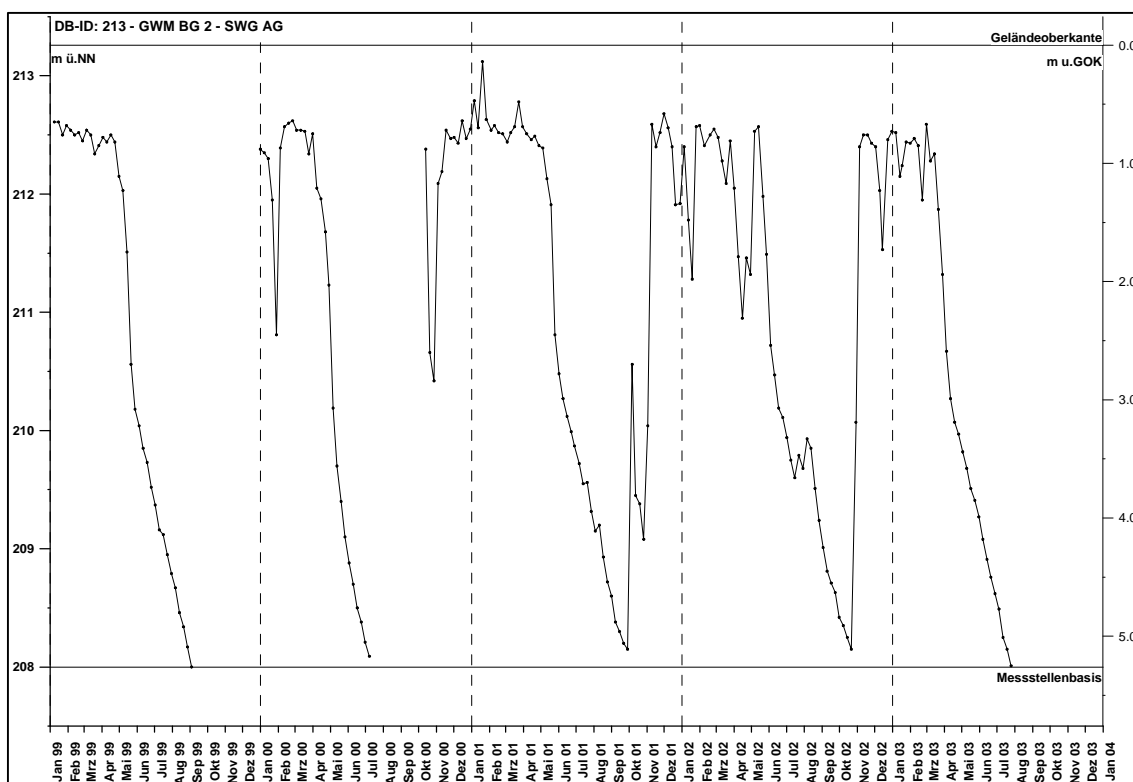


Abb. 5-5: Grundwasserstandsganglinie der „GWM BG 2“, SWG AG, Datenbank-ID: 213

Als zweites Beispiel für das **obere Grundwasserstockwerk** kann die 1987 gebohrte „GWM BG 4“ der SWG AG (entspricht Nr. 461003 des HLU) angesehen werden. Sie befindet sich innerhalb von Queckborn, hat eine Bohrtiefe von 11 m u. GOK und einen Bohrdurchmesser von 125 mm. Das Filterrohr erstreckt sich von 7,70 m bis 10,70 m u. GOK; über eine entsprechende Abdichtung ist nichts bekannt. Aufgrund der vorliegenden Daten des HLU (zusätzlich zu den Daten der SWG AG) konnte für diese Grundwassermessstelle ein etwas längerer Zeitraum

(1997 bis 2003) graphisch dargestellt werden. In der dargestellten Grundwasserstandsganglinie (Abbildung 5-6) kann man den typischen Verlauf für das obere Grundwasserstockwerk verfolgen. Insgesamt lässt sich ein Jahresgang im Verlauf des Grundwasserpotentials erkennen, der jedoch von kurzfristigen Reaktionen auf Grundwasserneubildungsphasen und Zeiten stärkerer Speicherentleerung überlagert wird. Es lässt sich feststellen, dass die Speicherentleerung tendenziell über einen längeren Zeitraum stattfindet als die Speicherfüllung. Der Grundwasserpotential-Schwankungsbetrag in dem hier dokumentierten Zeitraum (7 Jahre) beträgt rund 3 m.

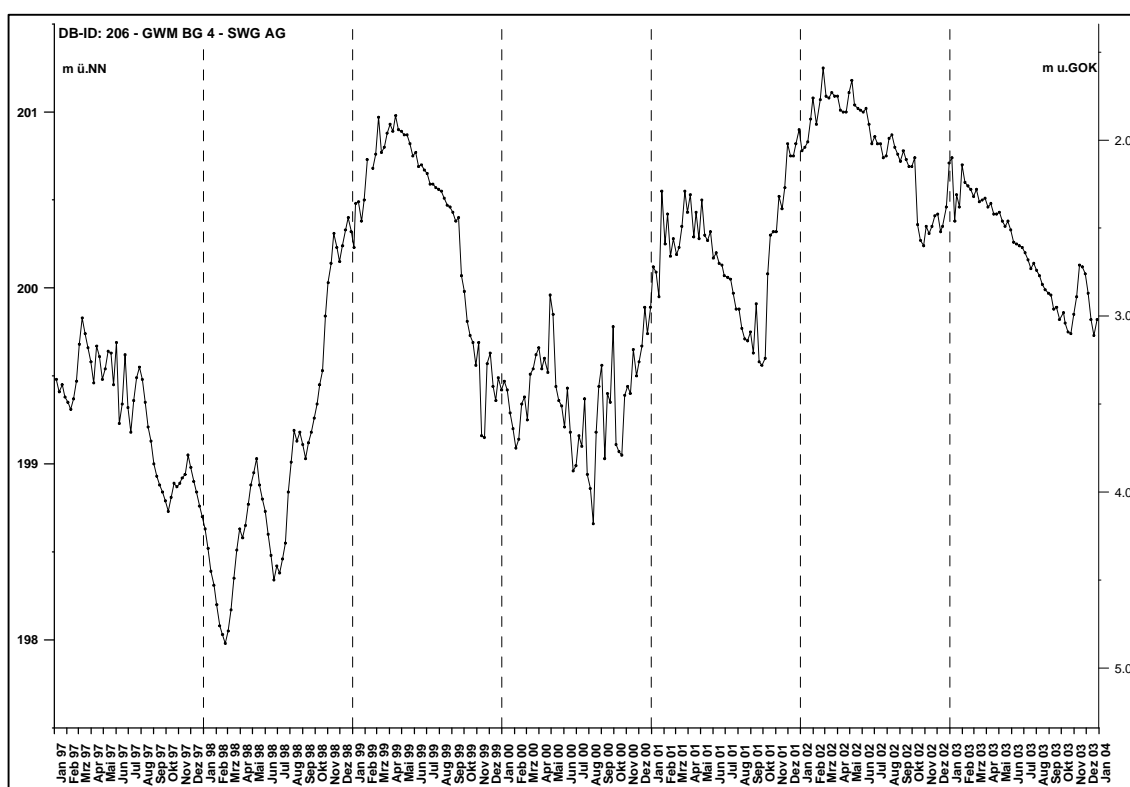


Abb. 5-6: Grundwasserstandsganglinie der „GWM BG 4“, SWG AG, Datenbank-ID: 206

In der nachfolgenden Grafik (Abbildung 5-7) der 1952 angelegten Grundwassermessstelle „Burkhardsfelden“ (Betreiber HLUg, DB-ID: 460029) kann man den langfristigen Grundwasserpotentialverlauf des obersten Grundwasserstockwerks beobachten. Sie befindet sich innerhalb von Burkhardsfelden (Gemeinde Reiskirchen) und erreicht eine Bohrtiefe von 17,4 m u. GOK. Analog zur oben dargestellten „GWM BG 4“ lässt sich ein Jahresgang im Verlauf des Grundwasserpotentials erkennen, der jedoch gleichfalls kurzfristige Reaktionen auf Grundwasserneubildungsphasen und Zeiten stärkerer Speicherentleerung aufweist. Der

Grundwasserpotential-Schwankungsbetrag im dokumentierten Zeitraum (33 Jahre) beträgt rund 4 m.

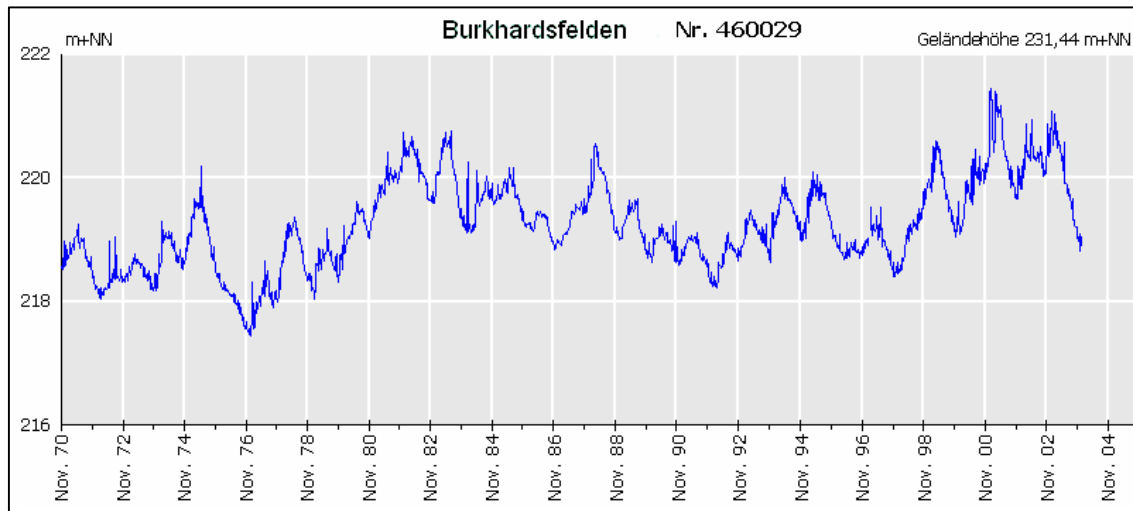


Abb. 5-7: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Burkhardtsfelden“, HLUg, Datenbank-ID: 460029 (aus www.hlug.de)

Beispiel für eine Grundwassermessstelle im **mittleren Grundwasserstockwerk** ist die im April 1995 gebohrte „GWM Br. 34 tief“ der SWG AG (Abbildung 5-8). Sie befindet sich westlich von Queckborn in der Nähe der sog. Sommersmühle, hat eine Bohrtiefe von 40 m und einen Bohrdurchmesser von 324 mm. Die oberen 30,37 m sind mit Bentonit abgedichtet und das Filterrohr erstreckt sich von 35,87 m bis 39,87 m u. GOK. Im Verlauf der Grundwasserstandsganglinie (Zeitraum 1999 bis 2003) kann man deutlich den Jahresgang in den Grundwasserständen erkennen. Es zeigt sich, dass fast keine kurzfristigen Speicherfüllungs- oder Entleerungsphasen vorhanden sind. Die Speicherentleerung beginnt im Vergleich zum oberen Grundwasserstockwerk um etwa einen Monat zeitversetzt im Mai/Juni und auch die Phase der Speicherfüllung setzt erst einen Monat später im November/Dezember des jeweiligen Jahres ein. Dabei stellt sich das Grundwasserpotential zumeist (mit Ausnahme des Jahres 2000) wieder auf den für dieses Grundwasserstockwerk oberen Wert von rund 189 m ü.NN ein. Die Gradienten der jeweiligen Phasen (Speicherentleerung/Speicherfüllung) sind im Gegensatz zum oberen Grundwasserstockwerk sehr ähnlich, d.h. die jeweilige Phase findet über einen ähnlich langen Zeitraum statt. Der Grundwasserpotential-Schwankungsbetrag im hier dokumentierten Zeitraum (5 Jahre) beträgt rund 3 m.

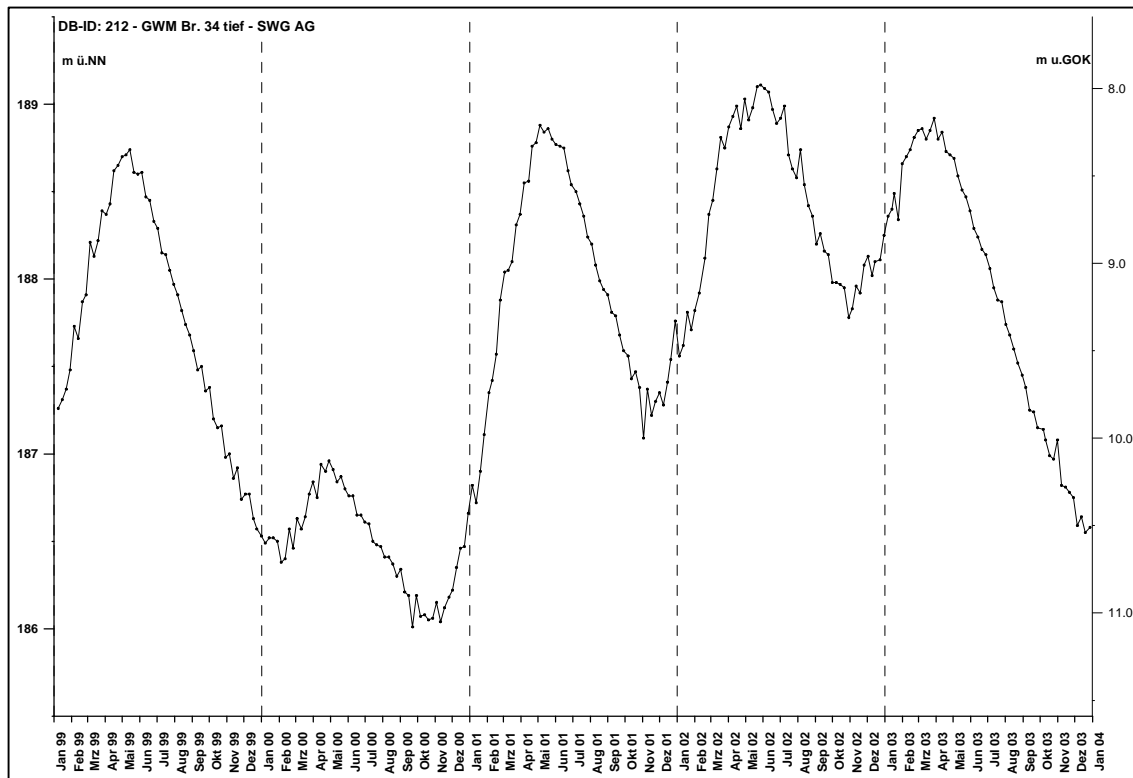


Abb. 5-8: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Br. 34 tief“, SWG AG, Datenbank-ID: 212

Als Beispiel für eine Grundwassermessstelle im **unteren Grundwasserstockwerk** kann die im Jahr 1980 gebohrte „GWM Villingen“ (OVAG-Kurzname: IMT200) der OVAG angesehen werden (Abbildung 5-9). Sie befindet sich südöstlich von Villingen, hat eine Bohrtiefe von 131 m und einen Bohrdurchmesser von 305 mm. Die oberen 68,0 m sind mit Ton abgedichtet. Die Filterstrecken erstrecken sich von 87,0 m bis 105,0 m u. GOK. Im Verlauf der Grundwasserstandsganglinie (Zeitraum 1994 bis 2002) kann man nur schwach einen Jahresgang erkennen. Deutlicher zeigen sich hier langfristige Grundwasserstandsentwicklungen. Insgesamt kann man innerhalb des hier dokumentierten Zeitraums einen deutlichen AG Trend zu höheren Grundwasserständen feststellen, obwohl in den Jahren 1996 bis 1998 eine fallende Tendenz vorhanden ist und auch hier in 2000 eine nicht so ausgeprägte Speicherauffüllung (analog zur o.g. „GWM Br. 34 tief“) stattfindet. Die Phasen der Speicherentleerung beginnen ungefähr im Juni, die Phasen der Speicherfüllung im November/Dezember des jeweiligen Jahres, wenn sie denn nicht durch die langfristigen Trends zu stark überlagert sind. Erneut ist ein zeitversetztes Einsetzen der jeweiligen Speicherungsphase im Vergleich zum oberen Stockwerk festzustellen. Es lässt sich jedoch

nicht eindeutig eine zusätzliche zeitliche Verzögerung im Vergleich zum mittleren Grundwasserstockwerk beobachten. Die Gradienten der jeweiligen Phasen (Speicherentleerung/Speicherfüllung) ähneln jenen des mittleren Grundwasserstockwerks, wenn sie denn entsprechend ausgeprägt sind und nicht durch die langfristigen Effekte beeinflusst werden. Der Grundwasserpotential-Schwankungsbetrag beträgt im hier dokumentierten Zeitraum (9 Jahre) etwa 9 m, ist jedoch innerhalb eines Jahres deutlich geringer (maximal ca. 3 m).

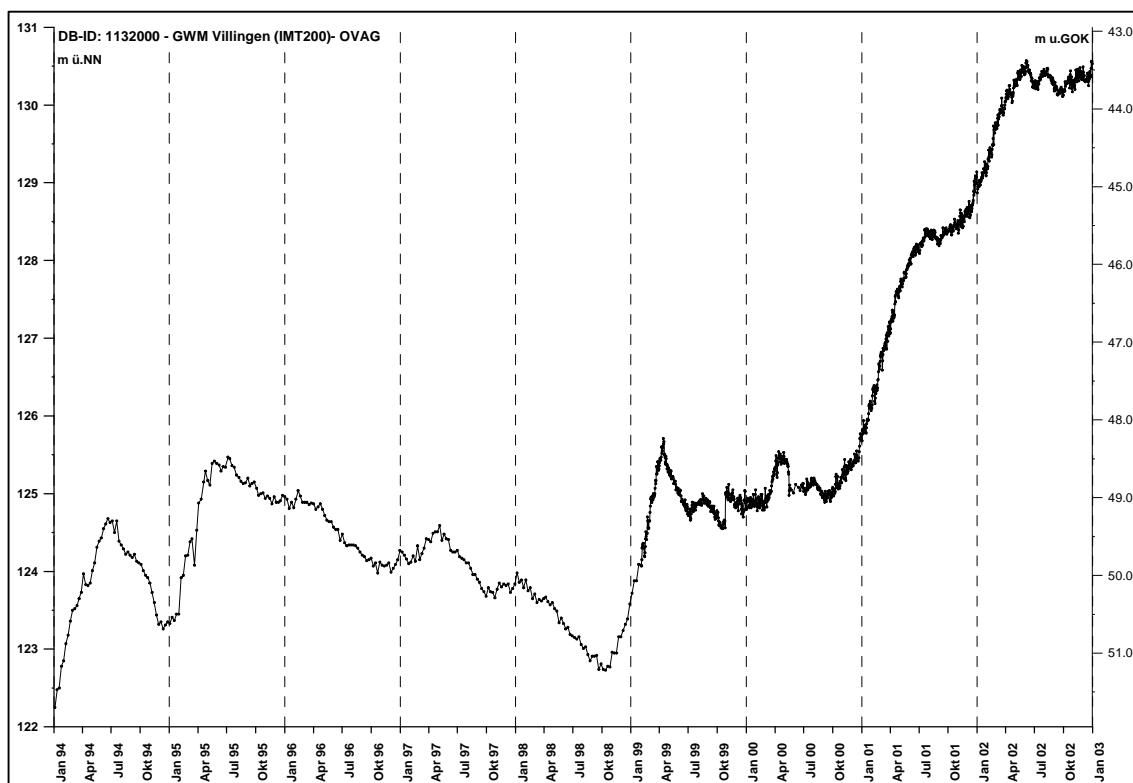


Abb. 5-9: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Villingen“, OVAG, Datenbank-ID: 1132000

Als weiteres Beispiel für eine Grundwassermessstelle im **unteren Grundwasserstockwerk** dient die im Jahr 1913 gebohrte „GWM Villingen“ (OVAG-Kurzname: IMT225) der OVAG (Abbildung 5-10). Sie befindet sich innerhalb von Villingen, hat eine Bohrtiefe von 49,75 m und einen Durchmesser von 250 mm. Die oberen 30,37 m sind mit Bentonit abgedichtet. Das Filterrohr erstreckt sich von 19,0 m bis 39,0 m u. GOK. Für diese Grundwassermessstelle liegt ein sehr langer Beobachtungszeitraum vor. Im Verlauf der Grundwasserstandsganglinie (Zeitraum 1950 bis 2002) ist wie in der o.g. Grundwassermessstelle des unteren

Grundwasserstockwerks nur schwach ein Jahresgang zu erkennen. Durch den sehr langen Beobachtungszeitraum zeigen sich hier die langfristigen Grundwasserstandsentwicklungen in der Grundwasserstandsganglinie noch deutlicher. Sehr ausgeprägt zeichnen sich die Trockenphasen Mitte der 60er, der 70er und der 90er ab. Die maximale Grundwasserpotentialdifferenz beträgt rund 22 m, ist jedoch innerhalb eines Jahres deutlich geringer (maximal ca. 4 m).

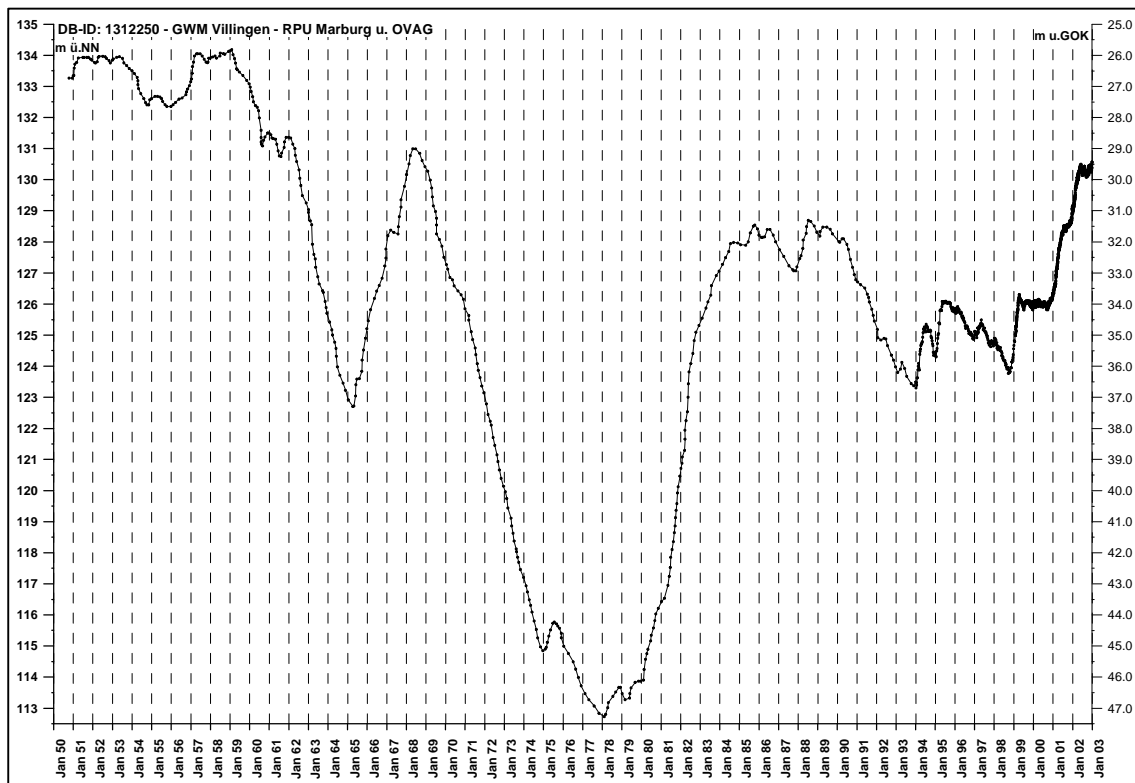


Abb. 5-10: Grundwasserstandsganglinie der „GWM Villingen“, OVAG u. RPU Marburg, Datenbank-ID: 1312250

5.4.2 Konzeption für das numerische Grundwassermodell

5.4.2.1 Darstellung der wesentlichen geohydraulischen Prozesse

Für die Entwicklung der Modellkonzeption sind zunächst die **maßgeblichen geohydraulischen Prozesse** beim derzeitigen Zustand zu betrachten. Diese stellen sich wie folgt dar:

- Das Untersuchungsgebiet lässt sich durch ein **mehrschichtiges Grundwasserstockwerkssystem** darstellen und wie in Kapitel 5.4.1.5 beschrieben in drei Hauptgrundwasserstockwerke unterteilen. Das oberste Grundwasserstockwerk wird durch die in den Talbereichen vorhandenen quartären Ablagerungen und den darunter anstehenden Basalt gebildet. Dabei können aufgrund von Trennhorizonten (zumeist Tufflagen) lokal begrenzte schwebende Grundwasserstockwerke vorkommen. Dies wurde bereits in Kapitel 5.4.1.6 näher beschrieben. Die Grundwasserpotentialschwankungen werden vor allem durch den Grundwasserneubildungsprozess (Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag) und in den direkten Talbereichen auch durch Wasserpotentialschwankungen in den Vorflutern ausgelöst.
- Das obere und das mittlere Grundwasserstockwerk sind jeweils durch mächtige Tuffhorizonte oder durch dichte, massige Basalte vom jeweils darunter befindlichen Grundwasserstockwerk getrennt.
- Die Basaltbasis stellt die **Modellbasis** für das untere Hauptgrundwasserstockwerk dar. Obwohl in den paläozoischen und mesozoischen Gesteinseinheiten und tertiären Sedimenten unterhalb der Basaltbasis durchaus Grundwasserleiter ausgebildet sind, existiert - wie in Kapitel 5.4.1.5 bereits beschrieben - eine weitgehende hydraulische Trennung zwischen dem basaltischen und den tieferen Stockwerken. Sie wird hauptsächlich durch einen ausgedehnten, mehrere Meter mächtigen Tuffhorizont an der Basaltbasis hervorgerufen.

Ziel der numerischen **Grundwassermodellierung** ist die realitätsnahe **Reproduktion der vorhandenen Grundwasserströmungssituation** unter Berücksichtigung aller bekannten Grundwasserentnahmen und der vorhandenen Grundwasseraufschlüsse.

5.4.2.2 Modellkonzeption

Unter Berücksichtigung des Untergundaufbaus ist aus den oben beschriebenen geohydraulischen Prozessen folgende Modellkonzeption abzuleiten (siehe Anlage 3.7):

- Die vorhandenen Grundwasserentnahmen und der Grundwasserneubildungsprozess stellen jeweils raumzeitlich begrenzte variable Zustände dar. Dementsprechend ist mit zeitlich variablen Auswirkungen auf das Umfeld resp. das Grundwassersystem zu rechnen. Diese Situation erfordert daher die **Erstellung und Anwendung eines instationären Grundwasserströmungsmodells**.
- Der Untergundaufbau erfordert in Verbindung mit den vorliegenden geohydraulischen Zuständen ein **mehrschichtiges Grundwassermodell**, das als 3-Schicht-Modell erstellt wird.
- Aufgrund der vorliegenden hydrogeologischen Modellvorstellung muss, ausgehend von dem eigentlichen Kerngebiet (Queckborn), ein großräumiges Grundwassermodell erstellt werden, das den realitätsnahen Zu- und Abstrom aller wichtigen Grundwasserleiter ermöglicht. Ausgehend von der hydrogeologischen Modellvorstellung wurde das Modellgebiet wie folgt erweitert: im Norden bis zur oberirdischen Grundwasserscheide nördlich des Lumdatales, in östliche Richtung bis zum Hohen Vogelsberg und in südöstliche Richtung bis zur Grundwasserscheide zwischen Horloff und Nidda. In südwestlicher Richtung wurde eine Trennstromlinie zwischen der Göns, der Wetter und der Horloff als Modellbegrenzung angesetzt und in westlicher Richtung bildet hauptsächlich die Lahn den Modellrand. Es wurde bewusst nicht der Rand der Basaltverbreitung als Modellrand verwendet, um einen Grundwasserabfluss in westliche Richtung aus dem Basaltverbreitungsgebiet zu ermöglichen und speziell im südwestlichen Bereich einen denkbaren Zufluss über diesen Modellrand aus dem Verzahnungsbereich zwischen Basaltverbreitung und den westlich davon anstehenden Gesteinen (Tertiär, Paläozoische Sedimente) zu ermöglichen.
- In den westlichen Bereichen außerhalb des Basaltverbreitungsgebiets werden die zweite und dritte Modellschicht deaktiviert. Dies betrifft auch den Bereich südwestlich

von Lich ohne entsprechende Basaltverbreitung. Ein oberirdischer Abfluss in die Vorfluter wird somit ermöglicht.

- Die **Oberflächengewässer** im Modellgebiet werden als **Leakage-Randbedingungen** (Typ: RIVER oder DRAIN) in der ersten Modellschicht umgesetzt. Die **Höhenlagen** der Gewässer sind gemäß den vorliegenden Angaben in der **TK 25** vorgegeben.
- Die im relevanten Grundwasserstockwerk wirksame **Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag** innerhalb des Modellgebietes wird als flächenhaft wirksame, zeitlich variable Randbedingung in der ersten Modellschicht vorgegeben. Die Quantifizierung erfolgt gemäß den Angaben in Kapitel 5.4.1.3. Dabei ist zu beachten, dass die Grundwasserneubildung in der **obersten aktiven** Modellschicht erfolgt. Falls Teile der obersten Modellschicht trockenfallen, wird die Grundwasserneubildung automatisch in der zweiten Modellschicht angesetzt.
- Die vorhandenen **Grundwasserentnahmen** im Modellgebiet werden als Brunnen mit den ermittelten Entnahmedaten in den betreffenden Modellschichten über den angesetzten Kalibrierungszeitraum (= Modellanpassung) **instationär** vorgegeben, d.h. also realitätsnah entsprechend dem tatsächlichen, variablen Brunnenbetrieb.

5.4.2.3 Strategie der Modellkalibrierung, Darstellung der Modellergebnisse

Realisiert ist ein numerisches Grundwassermodell nach der Finite-Differenzen-Methode mit dem **Rechenprogramm MODFLOW**.

Nach dem in Kap. 5.4.2.2 beschriebenen Modellkonzept und bei Vorgabe entsprechender Schichtgeometrien und Untergrundkennwerte wurde folgende Vorgehensweise bei der **Modellkalibrierung** praktiziert:

- **Stationäre Modellkalibrierung** mit dem Ziel realitätsnahe Startbedingungen für eine zukünftige instationäre Modellkalibrierung zu liefern und nachgewiesene instationäre Grundwasserstandsentwicklungen in Abhängigkeit vom Verlauf relevanter Grundwasserneubildungsprozesse realitätsnah nachzubilden. Für diese Startbedingung sollte ein ausreichend großer Zeitraum vor einem instationären Kalibrierungszeitraum

betrachtet werden, da das Grundwassermodell eine gewisse Einschwingzeit zur Anpassung an die realen Bedingungen benötigt.

- Die hierbei voraussichtlich erforderliche **Parametervariation** ist in hydrogeologisch-geohydraulisch plausiblen Grenzen durchzuführen und nachvollziehbar darzulegen. Dies gilt auch für den zu betrachtenden Modellzeitraum und die **Anfangsbedingungen** für eine instationäre Modellierung.
- Ziel der Modellanpassung ist die hinreichend genaue **Reproduktion gemessener Grundwasserstände** im Modellgebiet bei einer plausiblen Grundwasserbilanz. Zur **Bilanzkontrolle** werden die vorliegenden **Grundwasserneubildungsspenden** nach MATTHESS (1970) und HLFB (1997) an den **entschiedenen Leakage-Randbedingungen** im Modellgebiet herangezogen, die sich in entsprechenden berechneten **Leakage-Abflüssen** widerspiegeln sollten (bei Ansatz durchschnittlicher Bedingungen).
- Für die **Sensitivitätsbetrachtungen** erfolgt zunächst eine **Bewertung der wichtigen Parameter** bzw. eine Beurteilung, aus der hervorgeht, ob sie relativ gut oder eher schlecht abgesichert sind. Unter Berücksichtigung dieser Bewertung erfolgt die Untersuchung der möglichen Variationsbreite der das Ergebnis prägenden Parameter.
- Im Hinblick auf die **Plausibilitätsprüfung** des numerischen GwModells ist darauf hinzuweisen, dass der Grundwasserumsatz im Modellgebiet unter **instationären Bedingungen** nur **eingeschränkt** auf **Plausibilität** überprüft werden kann, da auf Grund fehlender und nicht zu erfassender Daten zum zeitlichen Verhalten der Abflüsse im Modellgebiet eine Wasserbilanzkontrolle nur eingeschränkt möglich ist.

Das stationär erstellte und kalibrierte Grundwassermodell bildet eine wesentliche Grundlage für alle wasserwirtschaftlichen und ökologischen Fragestellungen im Untersuchungsgebiet, mit dem kurzfristige Untersuchungen etwaiger Probleme möglich sind.

Die Modellergebnisse werden im Wesentlichen wie folgt dargestellt:

- Karten mit Darstellung der ermittelten Parameterverteilungen

- Erstellung von **Grundwassergleichenplänen und Bahnlinienplänen** (Bahnlinien mit Zeitmarken) für verschiedene hydrologische Zustände
- Grundwasserdifferenzenpläne, Grundwasserflurabstandspläne, Wasserbilanzdaten

5.4.3 Modellaufbau und Modellgebiet

5.4.3.1 Vertikaler Modellaufbau, Schichtgeometrien

Die Modellkonzeption wurde bereits in Kapitel 5.4.2 beschrieben. Demnach wird ein 3-schichtiges Grundwassermodell erstellt (siehe Anlage 3.7).

Als Modelloberkante wird die Geländeoberkante angesetzt. Diese wurde mit Hilfe des Digitalen Geländemodells des Hessischen Landesvermessungsamtes konstruiert und auf das Modellgitter interpoliert.

Die Basis des Modells kann auf der Grundlage der vorliegenden Daten zur Basaltbasis aus EHRENBERG & HICKETHIER (1985) und weiterer neuerer Erkundungsdaten konstruiert werden. Die Basaltbasis als Modellbasis wurde - wie bereits zuvor beschrieben - aufgrund des fast durchgehend verbreiteten Tuffhorizonts an der Basaltbasis und der dadurch vorliegenden weitgehenden hydraulischen Trennung zu den darunter befindlichen weiteren Grundwasserleitern gewählt. Auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist eine Nichtberücksichtigung der tiefer liegenden Grundwasserleiter als konservativer Ansatz zu sehen. Nach den vorliegenden Potentialdifferenzen zwischen basaltischem Grundwasserleiter und zumeist tertiärem Grundwasserleiter existiert gegebenenfalls ein Zustrom aus dem Basaltunterlager. Mit dem vorliegenden Ansatz wird das Grundwasserdargebot, wenn auch geringfügig, eher unterschätzt. Im relevanten Modellgebiet gibt es keine Entnahmen in den tiefer liegenden (unterhalb der Basaltbasis) Grundwasserstockwerken, so dass auch von dieser Seite keine Veranlassung für eine Berücksichtigung der tieferen Grundwasserleiter vorlag.

Für die Entwicklung der Schichtgeometrien des numerischen Rechenansatzes konnte mangels vorhandener flächenhafter Daten nicht der „Standardweg“ mit Hilfe von konstruierten Streichlinienkarten begangen werden. Daher wurden, falls punktuelle Daten über entsprechende Grundwasserleiter- und Grundwasserhemmerhorizonte an entsprechenden Bohrungen vorhanden waren, diese Daten umgesetzt. Für die Gebiete ohne entsprechende Daten erfolgte ein pragmatischer Dreischicht-Ansatz. Ausgehend von den sicheren Begrenzungen Geländeoberkante und Basaltbasis wurden die zwei Trennhorizonte zwischen Modellschicht 1 und 2 sowie 2 und 3 konstruiert. Für die Modellschicht 1 wurde eine Mindestmächtigkeit von 20 m vorgegeben, um ein Trockenfallen von zu vielen Zellen zu verhindern.

Leider kann man aufgrund der geologischen Deformationsgeschichte nicht sicher sein, ob der Großteil der in der Basaltbasis in EHRENBURG & HICKETHIER (1985) konstruierten Störungen prä-, syn- oder postmagmatisch ist. Diese eindeutige Zuordnung ist nur bei wenigen der dort festgestellten Störungen möglich.

Als numerisches Modellkonzept wurde der **Standard-MODFLOW-Ansatz** benutzt. Die Trennhorizonte werden nicht explizit als eigene Modellschicht berücksichtigt, wie es nach dem sog. „True Layer Approach“ der Fall wäre, sondern sie werden über einen sog. Leakage-Faktor modellintern berechnet. Die Geometriedaten der jeweiligen Schichtflächen kennzeichnen jedoch den Bereich des dazwischen liegenden Trennhorizontes eindeutig. Bei Vorgabe der Durchlässigkeit dieser Trennschicht in vertikaler Richtung kann der letztendlich maßgebliche hydraulische Parameter (hier: vertical conductance) des Trennhorizontes modellintern berechnet werden, so dass eine Verbindung der Grundwasserstockwerke gemäß dem Leakageprinzip entsteht. Der Tiefenbereich zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken (= hydraulische Trennschichten) zählt streng genommen nicht zum Modellraum. Dies erspart speziell für größere instationäre Grundwassermodelle sehr viele Daten, da für diese Trennhorizonte z.B. keine Grundwasserpotentiale und Fließgeschwindigkeiten berechnet werden. Hiermit werden also bei dem vorliegenden Grundwassermodell zwei Schichten eingespart (3 Schichten anstelle von 5 Schichten).

Das Grundwassermodell für den westlichen Vogelsberg wurde als 3-Schicht-Modell wie folgt aufgebaut (siehe Anlage 3.7):

- **Modellschicht 1 = Oberes Grundwasserstockwerk:** Quartärverbreitung und obere grundwasserleitende Basalthorizonte sowie tertiäre Sedimente im westlichen Modellgebiet
- **Modellschicht 2 = Mittleres Grundwasserstockwerk:** grundwasserleitende Basalthorizonte
- **Modellschicht 3 = Unteres Grundwasserstockwerk:** grundwasserleitende Basalthorizonte

Zwischen diesen grundwasserleitenden Stockwerken wirken die Tuffhorizonte und dichte, massige Basalte als Trennhorizonte.

5.4.3.2 Modellränder und äußere Randbedingungen

Neben der Grundwasserneubildung durch versickernden Niederschlag sind die als Vorfluter wirkenden Oberflächengewässer im Modellgebiet die wesentlichen natürlichen Randbedingungen (Leakage-Randbedingungen). Die Grundwasserneubildung erfolgt zunächst in der ersten Modellschicht. Falls keine Zellen in der ersten Modellschicht trockenfallen, erfolgt die Grundwasserneubildung in der zweiten und dritten Modellschicht nur über eine ZUSICHERUNG aus der ersten Modellschicht.

Für den Großteil des Modellgebietes wurden entlang von oberirdischen und/oder bekannten unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen No-Flow-Randbedingungen definiert (Randstromlinie mit $QR_{\text{Rand}} = 0 \text{ l/s}$). Speziell im westlichen Bereich des Modellgebietes stellen Fließgewässer, die als Leakage-Randbedingungen zu definieren sind, die randliche Begrenzung.

Auf die Vorgabe von Potential-Randbedingungen der 3. Art (Typ: General Head Boundary) als äußere Modellbegrenzung, die z.B. als westliche Begrenzung möglich gewesen wäre, wurde bewusst verzichtet, da sie sich zumeist als recht schwierig darstellt und über den entsprechend

möglichen Zufluss die Integrität der Grundwasserbilanz für wasserwirtschaftliche Aspekte negativ beeinflusst werden kann.

Potential-Randbedingungen der 3. Art (Typ: General Head Boundary) wurden jedoch für die vorhandenen Seen im Modellgebiet als innere Randbedingung verwendet.

5.4.3.3 Weitere Vorgaben für die Modellerstellung:

- In den Modellgebieten mit vorhandenen Grundwasserentnahmen ist eine feinere räumliche Diskretisierung zu wählen, um eine realitätsnahe Berechnung von Brunneneinzugsgebieten und die numerisch korrekte Berechnung von Grundwasserfließgeschwindigkeiten zu gewährleisten.
- Die Modellkalibrierung erfolgt in Form einer stationären Modellkalibrierung anhand der vorliegenden gemessenen Grundwasserganglinien und Abflussdaten im Modellgebiet.
- Bei der räumlichen Umsetzung der Grundwasserneubildung (als flächenhafter Zufluss in der obersten aktiven Modellschicht) ist eine Differenzierung hydrogeologisch plausibel vorzugeben.
- Mit dem kalibrierten Grundwassermodell ist die Berechnung von Grundwassereinzugsgebieten bestimmter Fassungen möglich. Weiterhin lassen sich stationäre Berechnungen zur Untersuchung von Dauerbetriebszuständen bzw. langfristiger Grundwasserentnahmen durchführen, die die Grundlage für die Festlegung des gewinnbaren Grundwasserdargebotes darstellen.
- Die Modellergebnisse werden in Form von Grundwassergleichenplänen, Bahnlinienplänen mit Zeitmarken und Wasserbilanzprotokollen dokumentiert. Hiermit sind Aussagen über die Bemessung von Wasserschutzgebieten der entsprechenden Grundwasserfassung möglich.

5.4.4 Hydraulische Randbedingungen

5.4.4.1 Grundwasserneubildung

Talquartär, Tertiäre Sedimente und Basalt:

In der ersten aktiven Modellschicht erfolgt die **Grundwasserneubildung** durch versickernden Niederschlag; dies ist die einzige **Zuflussrandbedingung** im Modellgebiet. Sie wird in der obersten aktiven Modellschicht als flächenhaft wirksamer Zufluss angesetzt, und zwar wie folgt:

- Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde mit Hilfe von **Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt** auf der Grundlage von gemessenen Niederschlags- und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ermittelt. Wegen der von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlichen Werte bildeten diese **Berechnungen** einen wichtigen Baustein des instationären Grundwassermodells. Gemessene Niederschlags- und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD: Stationen in Homberg/Ohm, Alsfeld-Eifa, Gießen-Liebigshöhe, Grebenhain-Herchenhain, Schotten und Bad Nauheim) wurden dabei im **Zeitraum vom 01.01.1996 bis 31.12.2002** ausgewertet.
- Ein wesentlicher Baustein einer klimatischen Bodenwasserbilanz ist die Abschätzung der potentiellen Verdunstung (potentielle Evapotranspiration) auf der Grundlage von Klimadaten. Im vorliegenden Fall wurde die aktuelle Verdunstung nach HAUDE (1954 u. 1955) / UHLIG (1954) mit einer Korrektur nach RENGER (1980) berechnet. Diese Methode wird in der Bundesrepublik Deutschland vielerorts angewendet und hat sich bewährt. Diese Berechnung wurde mit Hilfe einer mit VBA in Microsoft Excel 2000 neu programmierten Berechnungsroutine durchgeführt.
- Grundlage für die Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt bilden die tägliche Niederschlagssumme, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit um ca. 14:00 h an den jeweiligen DWD-Stationen.
- Der einsickernde Anteil (N_{Sicker}) des Niederschlags (N_{DWD}) wird in der oberen Bodenzone zunächst gespeichert und durch Verdunstungsprozesse reduziert. Der Parameter nutzbare Feldkapazität (n_{FK} [mm/dm]) definiert die Wassermenge, die in der (verdunstungswirksamen) oberen Bodenzone (effektive Durchwurzelungstiefe W_e [dm])

- Mächtigkeit max. ca. 1,0 m) entgegen der Schwerkraft gespeichert werden kann. Aus dem Produkt der nutzbaren Feldkapazität und der effektiven Durchwurzelungstiefe ergibt sich die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums ($nFKWe$ [mm]).
- Die im Grundwassermodell angesetzten $nFKWe$ -Werte basieren auf dem Hydrologischen Atlas von Deutschland des BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2003) und sind in der Anlage 3.4 dargestellt. Bei Überschreitung der nutzbaren Feldkapazität fließt das überschüssige Wasser als Grundwasserneubildung in den gesättigten Bereich ab.
 - Aufgrund des im Untersuchungsgebiet vorhandenen Reliefs ist von einem oberirdischen Direkt-Abfluss auszugehen, der jedoch quantitativ nicht bestimmt werden konnte. Daher stellt dies eine Komponente dar, die im Zuge der Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt ermittelt werden muss. Dabei wurden die mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells ermittelten Werte für die Grundwasserneubildung mit den Angaben in der Wasserbilanz des HLUG für den Zeitraum 1961 bis 1990 aus dem Umweltatlas von Hessen des HLUG (2003) verglichen. Die dabei ermittelten oberirdischen Direkt-Abflüsse sind im Modellgebiet nicht einheitlich verteilt und liegen zwischen 0 % und 33 %.
 - Eine weitere Einflussgröße für die Grundwasserneubildung stellt die Flächennutzung dar. Die für die $nFKWe$ -Werte verwendete Grundlage des Hydrologischen Atlas von Deutschland unterscheidet dabei zwischen Acker- und Grünlandnutzung, Waldnutzung sowie großräumig bebauten Gebieten. Für das Untersuchungsgebiet wurde daher diese Unterscheidung übernommen und bei den Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt berücksichtigt. Hierbei erfolgte mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells eine Umrechnung der Referenz-Evapotranspiration über Grünland nach HAUDE (1955) in die pflanzenspezifische Evapotranspiration für jede Nutzungsart. Mit Interzeptionsfaktoren für jede Nutzungsart wurden die kulturspezifischen Unterschiede der Interzeption entsprechend berechnet. Dies betrifft jedoch nur die Waldnutzung, da für Acker- und Grünlandnutzung keine Anpassung der Interzeption notwendig ist. Die Evapotranspirations- und Interzeptionsfaktoren stammen aus GROSSMANN (1996). Für die bewaldeten Flächen ist aufgrund des vor allem im Hohen Vogelsberg

überwiegenden Nadelwald-Bestandes von einer deutlich reduzierten Grundwasserneubildung auszugehen. Bei einer reinen Nadelwaldnutzung beträgt die Grundwasserneubildung nach den Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt weniger als 50 % vom maximalen Wert. Die Unterschiede in der Grundwasserneubildung aufgrund der Landnutzung wurden daher entsprechend zeitlich und räumlich differenziert umgesetzt.

- Die modellrelevanten Ergebnisse sind in der Anlage 4.5 im Zeitfenster der instationären Modellrechnungen (01.01.1996 bis 31.12.2002) dokumentiert.

Tiefere Basalthorizonte (Modellschichten 2 und 3):

In den tieferen Basalthorizonten (Modellschichten 2 und 3) wird normalerweise im gesamten Untersuchungsgebiet **keine flächenhafte Grundwasserneubildung** durch versickernden Niederschlag angesetzt. Die vertikale Zusickerung aus dem oberen Grundwasserstockwerk ergibt sich als Resultat aus der Modellierung (sog. Leakage-Prinzip). Eine Ausnahme hiervon tritt für den Fall ein, dass die erste Modellschicht aufgrund von trockenfallenden Modellzellen inaktiviert wird. In diesem Fall erfolgt der Ansatz der Grundwasserneubildung für diesen Bereich analog dem Ansatz für die erste Modellschicht.

5.4.4.2 Leakage-Randbedingungen

Neben den („äußeren“) Leakage-Randbedingungen in der Modellschicht 1 entlang bestimmter Abschnitte der Modellgebietsgrenzen (siehe Kapitel 5.4.3.2) sind auch die im Folgenden genannten Oberflächengewässer innerhalb des Modellgebietes als Leakage-Randbedingungen zu berücksichtigen. Dies sind im Wesentlichen folgende Gewässer (siehe Anlage 4.1):

- **Lahn und deren Zuflüsse:**
 - Gönsbach
 - Lückenbach
- **Lumda und deren Zuflüsse:**
 - Gonsbach
 - Kaulbach
 - Kesselbach
 - Schiffsbach

- Appenbörner Bach
- **Wieseck und deren Zuflüsse:**
 - Klingelbach
 - Bersöder Bach
 - Krebsbach
- **Wetter und deren Zuflüsse:**
 - Äschersbach
 - Josoller
 - Lauter
 - Albach
 - Welsbach
- **Horloff und deren Zufluss:**
 - Biebergaben
- **Ohm und deren Zuflüsse:**
 - Seenbach
 - Dorfbach
 - Lardenbach
 - Streitbach
 - Gilgbach
 - Rauchel
 - Sausel

Diese Oberflächengewässer sind in ihrer Lage realitätsnah vorgegeben, wobei vor allem in den randlichen Gebieten mit zunehmender Entfernung von den Gewinnungsgebieten in Folge der etwas gröberen Diskretisierung des Modells diese Gewässer in ihrem Verlauf etwas grober umgesetzt werden (siehe Anlage 4.1).

Der **Höhenverlauf** und der **Wasserspiegel der Gewässer** wurde, da für diese Untersuchung keine Einmessdaten vorlagen, aus der Topographischen Karte (TK 25) abgeschätzt. Für die wichtigen Gewässer wurde in Abhängigkeit von der Größe des Gewässers eine **Wassertiefe** zwischen **0,5 m** und **1 m** angenommen.

Die kleineren Gewässer sind in den Modellrechnungen als „Dränagen“ (Leakage-Randbedingung Typ: **DRAIN**) typisiert. Damit wird verhindert, dass sie speziell im Bereich ihres Ursprungs - hier ist das geodätische Niveau bzw. das Gefälle relativ unsicher - in unzulässiger Weise Wasser an den Untergrund abgeben. Das Grundwasserdargebot würde im Untersuchungsgebiet möglicherweise überschätzt.

Die größeren Vorfluter (Lahn, Lumda, Wieseck, Wetter, Horloff, Ohm und Teile der Quellflüsse) sind als Flüsse (Leakage-Randbedingung Typ: **RIVER**) modelltechnisch umgesetzt. Dieser

Randbedingungstyp erlaubt Infiltrationsprozesse, die jedoch nur im Bereich gewässernaher Brunnen denkbar sind (im Falle eventueller anteiliger Uferfiltratförderung).

Für den größten Teil der relevanten Gewässer werden die Untersuchungen von LEßMANN (1999) zu den Trockenfallstrecken im Gebiet des Vogelsberges als Grundlage für die Entscheidung verwendet, ob ein Gewässer als Leakage-Randbedingung vom Typ DRAIN oder RIVER einzustufen ist. In der vorliegenden Untersuchung werden die Gewässerstrecken, die von LEßMANN (1999) als Trockenfallstrecken ausgewiesen sind, als Dränagen (Leakage-Randbedingung Typ: **DRAIN**) angesetzt, die restlichen Abschnitte dagegen als Flüsse (Leakage-Randbedingung Typ: **RIVER**).

Bei der durchgeführten Diskretisierung und dem gewählten Bearbeitungsmaßstab werden die Gewässerbreiten modelltechnisch überschätzt. Dies ist aus hydraulischer Sicht beim vorliegenden regionalen Betrachtungsmaßstab jedoch unerheblich, weil der hydraulische Kontakt der Gewässer zum Untergrund durch einen separaten Leakage-Faktor (conductance) beschrieben wird, der nicht von der Geometrie der Modellzellen abhängt. Sofern detaillierte Informationen über das Grundwasserniveau in unmittelbarer Vorflutnähe vorliegen (Vorfluternahe Grundwassermessstellen), kann der Parameter „Gewässer-Conductance“ (= hydraulische Leitfähigkeit der Gewässersohle) kalibriert werden. Im vorliegenden Fall ist er für die Modellrechnungen plausibel abzuschätzen.

Die vorhandenen **Quellen** im Modellgebiet werden als Leakage-Randbedingungen vom Typ **DRAIN** umgesetzt. Mit diesem Leakage-Randbedingungstyp wird gewährleistet, dass über diese Randbedingung entsprechend den wirklichen Verhältnissen nur Grundwasser aus dem Grundwassermodell entnommen werden kann.

In der zweiten und dritten Modellschicht sind **keine Leakage-Randbedingungen** angesetzt.

5.4.4.3 Grundwasserentnahmen

Die vorhandenen **Grundwasserentnahmen** werden als Brunnen mit den ermittelten Entnahmedaten in den betreffenden Modellschichten über den angesetzten

Kalibrierungszeitraum (= Modellanpassung) **instationär vorgegeben**, d. h. also realitätsnah entsprechend dem tatsächlichen, variablen Brunnenbetrieb. Die Zuordnung der Entnahmen zu den jeweiligen Modellschichten erfolgt, wenn bekannt, dem Ausbau des Brunnens entsprechend. Falls der Ausbau nicht bekannt ist, erfolgt die Zuordnung mit Hilfe einer Abschätzung anhand der Brunnentiefe, der Basaltnächtigkeit und der Modellgeometrie am jeweiligen Brunnenstandort.

Tabelle 5-1: Größe der Grundwasserentnahmen für das Jahr 1994 und Zuordnung zu den modellrelevanten Grundwasserleitern bzw. Modellschichten

| Modellschicht | Entnahmemenge [l/s] |
|---------------|---------------------|
| 1 | 117,5 |
| 2 | 411,1 |
| 3 | 357,3 |

Dabei ist zu beachten, dass die zeitliche Auflösung der Entnahmeraten an den verschiedenen Brunnen sehr unterschiedlich ist. Für die Brunnen der OVAG standen für den gesamten Kalibrierungszeitraum tägliche Fördermengenmessungen zu Verfügung.

Für den Großteil der Brunnen im Untersuchungsgebiet waren für den Kalibrierungszeitraum monatliche Fördermengen bekannt.

Für einen Teil der Brunnen (speziell im östlichen Vogelsbergkreis) lagen nur Jahresfördermengen vor, diese aber nicht immer kontinuierlich, so dass mit den vorhandenen Daten auf die nicht vorliegenden Zeiträume extrapoliert werden musste.

5.4.5 Weitere Vorgaben für die Modellkalibrierung

Geohydraulische Kennwerte:

Aufgrund der großen lithologischen Unterschiede und der unterschiedlichen Kluftgefüge ist für die geohydraulischen Kennwerte im Untersuchungsgebiet ein großes Wertespektrum zu erwarten. Sie können schwach bis stark durchlässig sein. Von HANAUER (1982) wird für die Durchlässigkeitsbeiwerte ein Bereich zwischen 2×10^{-3} m/s und 10^{-7} m/s angegeben. Auch die

im Untersuchungsgebiet vorhandenen Leistungs-Absenkungs-Quotienten (L_q), die zwischen $< 1 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ und $25 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ liegen, bestätigen die zu erwartenden sehr unterschiedlichen Durchlässigkeiten.

Für die zu erwartenden Porositäten gilt das oben Genannte. Sie können sich aufgrund von unterschiedlicher Lithologie und Klüftgefüge in dem großen Bereich zwischen $< 0,1 \%$ und $> 20 \%$ bewegen.

Eine Ausnahme bilden die Speicherkoeffizienten, die sich für den Festgesteinsuntergrund um $< 1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ bewegen sollten. Für die Bereiche mit Quartär- oder Tertiärverbreitung dürfen sie zwischen $1 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ und $5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ liegen.

Grundwasserstände im weiteren Umfeld:

Um speziell für die tieferen Grundwasserstockwerke (und Modellschichten) einen hydrogeologisch plausiblen Grundwassergleichenplan zu erstellen, wurden auch die Grundwasserstände im weiteren Umfeld ermittelt. Bei der Erstellung des unter anderem auf dem Grundwassergleichenplan basierenden hydrogeologischen und numerischen Modells wurden diese Grundwasserstände entsprechend berücksichtigt. Somit ist gewährleistet, dass kein relevanter Grundwasserab- oder -zustrom über die Modellränder im Grundwassermodell vernachlässigt wurde.

Grundwasserbilanz:

Entlang der Vorfluter und ihrer entsprechenden Zuflüsse wurden bereits von MATTHESS (1970) in 1962 umfangreiche Abflussmessungen durchgeführt. Für den Sommer 1994 wurden im Rahmen der Untersuchungen zur Hydrogeologie des Vogelsberges vom damaligen Hessischen Landesamt für Bodenforschung (HLFB [1997]) erneut umfangreiche Abflussmessungen vorgenommen. Teilweise wurde an etwas anderen Messpunkten als bei den Messungen von MATTHESS (1970) der Abfluss gemessen. Dafür wurde der Bereich der Abflussmessungen noch etwas erweitert. Die gemessenen Gewässer sind als Leakage-Randbedingungen in das Grundwassermodell integriert. Das kalibrierte Modell sollte also die ermittelten korrigierten

Trockenwetterabflüsse entlang der betreffenden Leakage-Randbedingung realitätsnah wiedergeben.

Eine Aufstellung der ermittelten Grundwasserneubildungsspenden ist in der Anlage 3.8 dargestellt. Die vom HLFB für den Sommer 1994 gemessene Grundwasserneubildungsspende ist als **Zielgröße** bei der Modellkalibrierung zu berücksichtigen, da auch der Grundwassergleichenplan für diesen Zeitraum erstellt wurde. Hiermit wird die Grundwasserbilanz auf ihre Plausibilität überprüft. Bevor diese Daten zur Verfügung standen, wurden eigene Abflussmessungen durchgeführt, die mit einem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programm automatisch ausgewertet werden und mit dem auch eine graphische Ausgabe der Messergebnisse erfolgt. In der Anlage 3.9 sind die Ergebnisse von zwei Abflussmessungen exemplarisch dargestellt.

5.4.6 Modellkalibrierung

5.4.6.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Die Modellkalibrierung ist nach den hydrogeologischen Vorarbeiten und der Organisation des numerischen Programms der letzte Schritt bei der Erstellung eines Grundwassermodells. Unter der Modellanpassung versteht man die Anpassung der Rechenergebnisse des Modells (= Grundwasserstände, Grundwasserfließgeschwindigkeiten und Grundwasserbilanzen) an das System. Der Anpassungsprozess besteht dabei im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Vervollständigung fehlender Modelldaten
- Regionalisierung der Daten, ausgehend von vorhandenen Informationen an Bohrungen und/oder Aufschlüssen
- Variation der Modellparameter im Rahmen der physikalischen Möglichkeiten und hydrogeologisch-geohydraulischer Plausibilitäts Grenzen

Zu den Modellparametern, die in diesem Zusammenhang betrachtet werden müssen, gehören zunächst alle Systemparameter wie

- Modellgeometrie (Modellschichten)
- Transmissivität bzw. Durchlässigkeit
- Entnahmen und/oder Zuflüsse (Infiltrationen, Brunnen, etc.)
- Grundwasserneubildungsrate
- Zufluss-/Abflussraten

Im Interesse der Eindeutigkeit der Modellkalibrierung ist es immer erforderlich, die Systemparameter dem Stand der Erkundung entsprechend in Klassen einzuteilen und lediglich die am wenigsten bekannten Parameter (oder die mit der größten Variabilität) zu kalibrieren.

Hierbei bietet sich folgende **Parametereinteilung** an:

- **Klasse 1:** Die Parameter sind bekannt oder in Plänen vergleichsweise genau dargestellt und werden für die Rechnung fest vorgegeben:
 - **Modellgeometrie:** Verlauf des Modellrandes, Schichtlagerungen, Verbreitung des Aquifers
 - Verlauf und geodätische Höhe von **Oberflächengewässern**
 - **Brunnenentnahmen**
 - **Grundwasserneubildungsspende** quantifiziert auf der Basis der Wasserbilanz des HLUG (2003) und von DWD-Daten mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells
- **Klasse 2:** Die Eckwerte der Parameter sind aus Erkundungsmaßnahmen bekannt oder anhand von Erfahrungswerten einzugrenzen. Der Mittelwert wird für die Modellkalibrierung vorgegeben und im Zuge der Kalibrierung nicht oder nur noch geringfügig geändert. Der obere und untere Grenzwert wird im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen als „quasi-bekannt“ deklariert :
 - **Durchlässigkeiten** im Bereich von Grundwassermessstellen und Brunnen, an denen Auswertungen von Pumpversuchsdaten vorliegen
 - **Geohydraulischer Gewässeranschluss** für die modellrelevanten Gewässer. Es wird im Allgemeinen ein guter hydraulischer Kontakt der Gewässer zum Untergrund unterstellt, so dass das Grundwasserpotential am Gewässerrand in

erster Näherung das Vorflutniveau annimmt. Dieser Modellparameter (sog. Gewässer-Conductance) hat somit im vorliegenden Modellansatz keine besondere Bedeutung für das Druckhöhenfeld im Grundwasserleiter.

- **Klasse 3:** Zielgrößen der Kalibrierung
 - **Horizontale Durchlässigkeiten (k_{fh})** der Modellschichten 1 bis 3 (Homogenbereiche mit konstantem k_{fh})
 - **Speicherkoeffizienten S** der Modellschichten 1 bis 3 (Homogenbereiche mit konstantem S_s bzw. S_y)
 - **Vertikale Durchlässigkeit (k_{fv}) der Trennhorizonte** zwischen den Grundwasserstockwerken 1 und 2 sowie 2 und 3 (Homogenbereiche mit konstantem k_{fv})

5.4.6.2 Kalibrierungskriterien und -ziele

Wesentliches Ziel des Grundwassermodells ist eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Grundwasserströmungssituation, mit der die Beurteilung des Grundwasserumsatzes, dessen Dynamik in den relevanten Grundwasserstockwerken und die Einschätzung des gewinnbaren Grundwasserdargebotes ermöglicht wird. Auch die Berechnung von Einzugsgebieten z.B. für die Planung bzw. Überprüfung von Wasserschutzgebieten ist hiermit möglich.

Im Untersuchungsgebiet stehen aufgrund der großen Bedeutung für die regionale Trinkwassergewinnung sehr viele Grundwassermessstellen zur Verfügung, von denen langjährige Grundwasserganglinien vorliegen. Hier sind vor allem die OVAG, das HLOG und die SWG AG als Datenquellen zu nennen. Mit diesen vorliegenden Grundwasserganglinien ist es somit im Zuge der Modellkalibrierung zunächst erforderlich, eine Anpassung der errechneten zeitlich variablen Piezometerhöhen an die gemessenen Grundwasserganglinien zu erreichen. Vom Rechenmodell muss eine **plausible Piezometerhöhenverteilung** ausgewiesen sein, die mit der hydrogeologischen Gesamtsituation schlüssig übereinstimmt.

Zudem sind an den modelltechnisch umgesetzten Gewässern die gemessenen Abflüsse sowie die Schüttungen an den vorhandenen Quellen im Untersuchungsgebiet modellmäßig zu

reproduzieren. Für etwaige Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Abflüssen sind - falls möglich - die Ursachen festzustellen.

Das numerische Rechenergebnis ist letztendlich erst dann akzeptabel, wenn die kalibrierten Größen (siehe Klasse 3 in Kapitel 5.4.6.1) in plausiblen Grenzen liegen. Dies trifft für k_f -Werte beispielsweise dann zu, wenn die Größenordnung, d. h. $\log(k_f)$ mit den entsprechenden $\log(k_f)$ - Werten der Felddaten übereinstimmt und mit den Erfahrungswerten für das betreffende Gebirgselement und/oder den Erfahrungswerten für die betreffende Region vereinbar ist.

5.4.6.3 Praktische Durchführung der Modellkalibrierung

Bei der vorliegenden Problemstellung sind primär Untergrundeigenschaften (horizontale und vertikale Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizienten/Nutzporositäten) für die modellrelevanten Schichten zu kalibrieren. Dies kann aus theoretischer Sicht nur dann gelingen, wenn (zumindest) für eine der genannten Modellkenngößen abgesicherte Felddaten vorliegen und wenn im Zuge der Vervollständigung der Modelldaten idealisierende Homogenitätsannahmen getroffen werden können.

Zunächst ist es erforderlich, **Startwerte** für die räumliche Verteilung der geohydraulischen Parameter zu definieren. Diese werden aus den vorliegenden hydrogeologischen Daten abgeleitet und entsprechend der geologischen Position, unter Beachtung von Lithologiewechseln und Störungzonen, räumlich verteilt.

Für eine instationäre Modellrechnung müssen geeignete Startwerte für die Grundwasserstände im gesamten Modellgebiet definiert werden. Für den Januar 1996 liegen entsprechende Felddaten nur bei einem Teil der Grundwassermessstellen vor, so dass theoretisch folgende Möglichkeiten für die Erstellung entsprechender Startbedingungen bestehen:

- Nutzung geeigneter numerischer Berechnungsergebnisse einer stationären Kalibrierung als Startwerte

- Approximation der Startwerte mit Hilfe eines Vergleichszustandes aus dem vorliegenden Messzeitraum (1994 - 2002) und Interpolation auf das gesamte Modellgebiet

Um für die Simulation von Grundwasserganglinien geeignete Startwerte zu erhalten, wurde der erste Weg beschritten, da unter anderem aufgrund der räumlichen Verteilung der vorhandenen Grundwassermessstellen eine ausreichend genaue flächendeckende Vorgabe der Startwerte nicht möglich war. Die manuelle Vorgabe von Startbedingungen ist zumeist recht problematisch, da in diesem Fall das System zu Beginn der instationären Grundwassermodellierung sich zunächst an die bestehende Durchlässigkeitsverteilung anpassen muss. Mit diesem Ansatz kommt es zu Beginn der instationären Grundwassermodellierung somit zu einer Überlagerung mit weiteren Prozessen (Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahmen), was zu Problemen bei der Kalibrierung führt. Dieser Ansatz ist aus geohydraulischer Sicht aus den o.g. Gründen so nicht korrekt.

Als **Anfangsbedingung für eine instationäre Modellkalibrierung** wurden die numerischen Berechnungsergebnisse der stationären Kalibrierung für den Stichtag "Sommer 1996" angesetzt. Auch hier stellt sich das Problem, dass nur an einem Teil der Grundwassermessstellen zu diesem Zeitpunkt entsprechende Grundwasserstandsmessungen vorliegen, so dass hier eine Interpolation aus dem gemessenen Zeitraum auf diesen Zeitpunkt erfolgen musste. An manchen (ehemaligen) Brunnen und Grundwassermessstellen liegen auch nur Grundwasserstandsmessungen vom Zeitpunkt der Erstellung vor, so dass auch hier eine Interpolation auf den relevanten Stichtag notwendig wurde. Die Startbedingungen müssen an den entsprechenden Grundwassermessstellen im Zuge einer instationären Grundwassermodellierung überprüft und angepasst werden, falls sich heraus stellt, dass die durchgeführten Interpolationen nicht korrekt waren.

Daher sollte bei einer instationären Modellrechnung auch vor dem eigentlichen Betrachtungszeitraum (Kalibrierungszeitraum) eine gewisse **Einschwingzeit** liegen. Die Dauer richtet sich zweckmäßigerweise nach der Periodizität der zu simulierenden hydraulischen Ereignisse. Diese Einschwingzeit ist umso wichtiger, umso ungenauer die Startbedingungen definiert werden können und dementsprechend die stationäre Kalibrierung nur teilweise durchgeführt werden kann.

Da beim Großteil der Grundwassermessstellen im Gewinnungsgebiet Queckborn, dem eigentlichen Modellkernbereich, erst ab Januar 1999 durchgehende Grundwasserstandsmessungen vorliegen und die Grundwasserstandsmessungen des HLUg ab Januar 1997 vorliegen, wird der **Simulationszeitraum** für eine instationäre Modellkalibrierung auf den **01.01.1996** bis **31.12.2002** festgelegt. Somit besteht bei den Grundwassermessstellen im Gewinnungsgebiet Queckborn eine ausreichend lange Einschwingzeit und auch für die vorliegenden Grundwasserstandsmessungen des HLUg ist noch eine ausreichende Einschwingzeit von einem Jahr vorhanden. Die Modellrechnung beginnt im Januar 1996 zu Beginn einer unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildungsphase. Der im System gespeicherte Grundwasservorrat kann sich innerhalb der Einschwingzeit bereits frühzeitig an das reale System anpassen. Das Ende des Simulationszeitraums wurde auf den 31.12.2002 festgelegt, da für die Berechnung der zeitlich variablen Grundwasserneubildung mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells zum Zeitpunkt der Datenabfrage nur bis zu diesem Zeitpunkt Daten des DWD vorlagen. Eine Verlängerung des Kalibrierungszeitraums ist immer problemlos möglich, falls die entsprechenden Daten vorhanden sind.

Die zeitliche **Diskretisierung** der Rechnung beträgt **1 Monat**. Innerhalb des Simulationszeitraums ergeben sich **84 Zeitschritte**.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der instationären Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells beschrieben:

- **Schritt 1:** Festlegung der als bekannt deklarierten Modell-Parameter (Modellgeometrie, geodätische Höhe der Flüsse, Brunnenentnahmen).
- **Schritt 2:** Vorgabe einer räumlich differenzierten Grundwasserneubildung entsprechend der Vorgaben in Kapitel 5.4.4.1 und Vorgabe einer räumlichen Verteilung der Durchlässigkeits- und Speicherkoeffizientenwerte.
- **Schritt 3:** Durchführung einer stationären Modellkalibrierung mit dem Ziel, plausible Piezometerhöhen sowie Grundwasserbilanzdaten (d.h. Übereinstimmung von

berechneten und gemessenen Abflüssen an den Leakage-Randbedingungen und an den Quellen) bei einer plausiblen Durchlässigkeitsverteilung zu berechnen und Verwendung dieser berechneten Piezometerhöhen zur Definition der Anfangsbedingungen für die instationäre Modellkalibrierung.

- **Schritt 4:** Durchführung der instationären Modellkalibrierung mit dem Ziel der weitgehenden Übereinstimmung der berechneten Grundwasserganglinien mit den gemessenen Grundwasserganglinien. Auf eine plausible Durchlässigkeitsverteilung und auf eine plausible Speicherkoeffizientenverteilung ist zu achten. Bei einer relativen Verschiebung der berechneten zu der gemessenen Grundwasserganglinie ist eine Überprüfung bzw. Korrektur der Startbedingungen notwendig (weiter bei Schritt 2).
- **Schritt 5:** Kontrolle der errechneten Durchlässigkeits- und Speicherkoeffizientenverteilung in Verbindung mit den berechneten Piezometerhöhen; eventuell Korrektur der Form der Homogenbereiche oder Definition zusätzlicher k_f - bzw. S -Regionen (ggf. erneut weiter bei Schritt 2).
- **Schritt 6:** Kontrolle der Grundwasserbilanz an den Abflussmesspunkten innerhalb des Modellgebietes und an den vorhandenen Quellen. Eventuell Korrektur der Grundwasserneubildungsrate und/oder der Durchlässigkeiten (ggf. erneut weiter bei Schritt 2).

Im Zuge der fortschreitenden Modellkalibrierung war es zur Modellverbesserung erforderlich, die Zahl der Durchlässigkeitszonen (k_{fh} - und k_{fv} - Zonen) und Speicherkoeffizientenzonen (S_s und S_y) zu erhöhen und deren Form schrittweise zu modifizieren. Die im Rahmen dieser „Lernphase“ erzielten Zwischenergebnisse werden hier aufgrund ihrer Fülle nicht dokumentiert.

Im Folgenden wird das Endergebnis der Modellkalibrierung diskutiert.

5.4.7 Ergebnis der Modellanpassung

5.4.7.1 Anpassungsgüte

Das Ergebnis der Modellanpassung ist in der Anlage 4 dokumentiert. Dabei werden im Wesentlichen folgende Darstellungsformen gewählt:

- k_{fh} - Verteilung in Kartenform
- k_{fv} - Verteilung in Kartenform
- Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserstände

Zur Dokumentation der Anpassungsgüte werden auch Darstellungen zur berechneten Grundwasserbilanz und zum Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserstände für den Anfangszustand abgebildet.

Im Zuge der stationären (und instationären) Modellkalibrierung zeigte sich, dass zunächst die gemessenen Grundwasserpotentiale im oberen Grundwasserstockwerk besser nachvollzogen werden konnten als im mittleren und unteren Grundwasserstockwerk. Für den stationären Ausgangszustand des instationären Grundwassermodells kann man insgesamt von einer recht guten Anpassung der berechneten Grundwasserstände an die gemessenen Grundwasserstände sprechen. Es zeigt sich, dass die berechnete normierte quadratische Abweichung (RMS) für ein regionales Grundwasserströmungsmodell einen recht guten Wert von 6,48 besitzt. Die Ergebnisse dieser Anpassung sind in der Anlage 4.2.2 dargestellt. Die berechnete numerische Wasserbilanz ist als sehr gut zu bezeichnen (siehe Anlage 4.2.1).

5.4.7.2 Berechnete Verteilung der geohydraulischen Parameter

Die ermittelte horizontale und vertikale Durchlässigkeitsverteilung ist in den Anlagen 4.3 und 4.4 in Kartenform dokumentiert. Folgende Punkte sind hervorzuheben:

- Im Rahmen der Modellkalibrierung wurden diverse **k_f -Wert-Regionen** gefunden, deren räumliche Erstreckung durch die geologische Situation und die unterschiedliche Messstellendichte geprägt ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden bei der

Darstellung der k_f -Wert-Verteilung Bereiche ähnlicher k_f -Werte zusammengefasst. Die zusammengefassten Bereiche unterscheiden sich in den verschiedenen Modellschichten, da hier auch die Wertebereiche unterschiedlich sind.

- Die räumliche Verteilung der horizontalen Durchlässigkeit (k_{fh}) ist in Anlage 4.3 dargestellt. Sie variiert in Abhängigkeit von der Modellschicht und den regionalen geologischen Verhältnissen zwischen $k_{fh} = 5 \times 10^{-3}$ bis 1×10^{-7} m/s.
- Für die Trennhorizonte zwischen der ersten, zweiten und dritten Modellschicht wurden vertikale Durchlässigkeiten (k_{fv}) zwischen 5×10^{-7} bis 3×10^{-12} m/s ermittelt. Hier ist die räumliche Verteilung in Anlage 4.4 dargestellt.
- Diese Wertebereiche spiegeln die sehr variablen Verhältnisse wider, die aufgrund der in der Literatur vorhandenen Angaben auch zu erwarten waren.
- Die ermittelte räumliche Verteilung des Primären Speicherkoefizienten (storativity) und des Sekundären Speicherkoefizienten (Specific yield), der der nutzbaren Porosität entspricht, ist nicht dargestellt. Der Primäre Speicherkoefizient variiert in Abhängigkeit von der Modellschicht und dem Untergrundaufbau zwischen $S = 1 \times 10^{-4}$ bis 4×10^{-6} 1/m. In Abhängigkeit von der Modellschicht und den Untergrundeigenschaften variiert die nutzbare Porosität recht deutlich. Für den Großteil des Basaltverbreitungsgebietes liegt die nutzbare Porosität im Bereich $< 3 \%$, jedoch wurden auch Bereiche mit Porositäten $> 15 \%$ ermittelt.

Die ermittelten Durchlässigkeiten, spezifischen Speicherkoefizienten und Porositäten sind mit den in der Literatur bekannten Werten für das Untersuchungsgebiet und den vorhandenen Gesteinen innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite plausibel in Einklang zu bringen.

5.4.7.3 Großräumiges Grundwasserströmungsbild

Das Ergebnis der stationären Modellkalibrierung wird in Form eines Grundwassergleichenplans für die drei Modellschichten in der Anlage 4.2.3 dargestellt. Hervorzuheben ist, dass der Verlauf der Grundwasserpotentialgleichen in der Modellschicht 1 maßgeblich durch den

geohydraulischen Anschluss an die Vorfluter und die lokalen Grundwasserscheiden geprägt ist. Entlang der Modellränder kommt es teilweise aufgrund einer starken Morphologie zu einem großen Gefälle. Dort fallen auch lokal einzelne Modellzellen trocken, was hydrogeologisch durchaus plausibel ist. Diese Bereiche werden in den Anlagen durch unterbrochene Grundwassergleichen dargestellt, da für diese Modellzellen keine Grundwasserstände berechnet werden.

Der Verlauf der Grundwasserpotentialgleichen in der 2. Modellschicht ähnelt in seinen Grundzügen den berechneten Grundwassergleichen der 1. Modellschicht. Im Bereich der Brunnen bilden sich teilweise Entnahmetrichter aus.

Der Verlauf der Grundwasserpotentialgleichen in der 3. Modellschicht ist stark geprägt durch die auf den Horloff-Graben und die Brunnen von Inheiden gerichtete Grundwasserströmung.

Die berechneten Grundwassereinzugsgebiete für die Gewinnungsgebiete von Queckborn und Inheiden (Hungen) sind in der Anlage 4.6 dargestellt. Beide Gewinnungsgebiete werden hauptsächlich aus nördlicher bzw. nordöstlicher Richtung angeströmt. In beiden Fällen sind sehr geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten festzustellen, was aufgrund der Berechnung des maximalen Grundwassereinzugsgebietes (die Startpunkte der Bahnlinien befinden sich an der Zellunterkante der jeweiligen Brunnenzelle) auch plausibel ist. Die berechneten (maximalen) Grundwasserfließzeiten für die Brunnen in Queckborn stehen nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Tritiumgehaltsbestimmungen in HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1993). Hier wird für den Hauptteil des Grundwassers ein Grundwasseralter von mehr als 35 Jahren angegeben. Wie erwartet, stellt das geförderte Grundwasser von Queckborn (und Inheiden) eine Mischung von alten und jungen Grundwasser-Komponenten dar; dies wird von der vorliegenden Untersuchung auch bestätigt.

5.4.7.4 Berechnete Grundwasserbilanz

Die berechnete Grundwasserbilanz wurde für den Anfangszustand in der Anlage 4.2.1 dokumentiert. Die Datenprotokolle für die instationären Berechnungen des Computercodes MODFLOW zur Grundwasserbilanz wurden wegen ihrer Fülle (84 Zeitschritte/Seiten) nicht in die Modellanlagen aufgenommen.

Die vom HLFB (1997) gemessenen Trockenwetterabflüsse konnten bei der stationären Kalibrierung für den Kalibrierungszustand durch die Modellrechnungen mengenmäßig zumeist **korrekt reproduziert werden**. Das vorliegende **Grundwassermodell** ist daher als **bilanzkontrolliert zu bezeichnen**.

5.4.7.5 Zusammenfassende Bewertung der Modellanpassung

Zusammenfassend lässt sich die Kalibrierung des Grundwassermodells für den westlichen Vogelsberg wie folgt bewerten:

- Das numerische Grundwassermodell ist **stationär kalibriert**, unter Berücksichtigung der vorhandenen Grundwasserentnahmedaten in dem Kalibrierungszeitraum in den wesentlichen Grundwassergewinnungsgebieten, soweit bekannt.
- Das Rechenmodell liefert für die stationäre Kalibrierung eine **schlüssige Piezometerhöhenverteilung bei einer plausiblen k_f -Wert-Verteilung**. Auch für die verschiedenen Zeitschritte der ersten instationären Kalibrierung zeigt der Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserganglinien teilweise eine recht gute Anpassung des Grundwassermodells an die realen Verhältnisse. Wie sich im Rahmen der instationären Kalibrierungen zeigte, war jedoch aufgrund des sehr langfristigen Speicherverhaltens im regionalen Modellgebiet innerhalb des betrachteten Zeitraums kein befriedigendes instationäres Kalibrierungsergebnis zu erreichen. Dieses Speicherverhalten ist z.B. in den Abbildungen 5-9 und 5-10 zu erkennen und wird durch langfristige Speicherfüllungs- und Leerungsprozesse wie Entnahme- und Grundwasserneubildungsvariationen geprägt. Die relevanten Fragestellungen lassen sich jedoch trotz dieser Unschärfen mit dem vorhandenen Grundwassermodell klären.
- Die gemessenen **Trockenwetterabflüsse** im Untersuchungsgebiet sowie die vorhandenen Quellschüttungen werden für die stationäre Kalibrierung (Anfangszustand) **realitätsnah reproduziert**. Die realen Grundwasserumsätze werden somit gut erfasst (Grundwasserbilanzkontrolle).

-
- Das Grundwassermodell ist in dieser Form als **Prognoseinstrument für die Verwendung in einem Grundwassermanagementsystem** geeignet. Es kann zur Untersuchung diverser Fragestellungen verwendet werden, die im Untersuchungsgebiet bestehen bzw. denkbar sind:
 - Berechnung von Grundwassereinzugsgebieten und Grundwasserfließgeschwindigkeiten bzw. Untergrundpassagezeiten im Hinblick auf WSG-Bemessungen.
 - Beurteilung des gewinnbaren Grundwasserdargebotes im Sinne eines quantitativen Grundwassermanagements.
 - Im Sinne eines qualitativen Grundwassermanagementsystems und des Grundwasserschutzes ist die Prognose von Grundwasserumsatzgeschwindigkeiten im Hinblick auf mögliche Maßnahmen zur Begrenzung der Einflüsse aus den landwirtschaftlichen Nutzungen möglich.
 - Die Berechnung von Grundwasserabsenkungen durch die Grundwasserentnahme ist möglich. Dies ist vor dem Hintergrund der Setzungsproblematik zu sehen, die unter anderem die Diskussionen zur Grundwasserentnahme im Bereich des Vogelsberges auslöste. Weiterhin stellen die ökologischen Einflüsse der Grundwasserentnahme eine wichtige Fragestellung bei dem vorliegenden Grundwassermanagementsystem dar. Sie können mit der Berechnung von Grundwasserabsenkungen ebenfalls beurteilt werden.

6 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine wissenschaftliche Analyse der Möglichkeiten der digitalen Informations- und Datenverarbeitung in der Hydrogeologie mit Hilfe von Datenbanken, Geographischen Informationssystemen (GIS) und Grundwassermodellen dar und soll eine Grundlage für zukünftige Bearbeitungen auf diesem Gebiet sein. Dabei wird vor allem die Kopplung von Datenbanken, Geographischen Informationssystemen (GIS) und Grundwassermodellen zu sogenannten Grundwassermanagementsystemen untersucht.

Ausgehend von der Tatsache, dass Trinkwasser auf der ganzen Welt das wichtigste Grundnahrungsmittel darstellt und in der Bundesrepublik Deutschland ca. 70 % des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen werden, kommt dem Grundwasserschutz weltweit eine ganz besondere Bedeutung zu. Das Grundwasser ist in besonderem Maße schützenswert, da hier zumeist eine notwendige Regeneration im Falle einer Kontamination ein langwieriger Prozess ist und auch eine mögliche Speicherentleerung durch Überförderung nur sehr langsam wieder rückgängig gemacht werden kann. Daher wurden schon früh Methoden entwickelt, die dem Zwecke dienen, den Schutz und die dauerhafte Verfügbarkeit von Trinkwasser zu verbessern.

Die Entwicklung der Grundwasserüberwachung zum Zwecke des Trinkwasserschutzes stellt die Grundlage für die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems dar. Ausgehend von der Tatsache, dass noch bis vor kurzem alle Daten zu Grundwasserfördermengen, Grundwasserpotentialmessungen oder Grundwasseranalysen hauptsächlich (bzw. umso länger man zurückgeht ausschließlich) im Papierformat festgehalten wurden, ist festzustellen, dass die Einführung eines Grundwassermanagementsystems immer wichtiger wird. Auch heutzutage werden immer noch sehr viele Informationen im hydrogeologischen Bereich, speziell in Gutachten, nur in analoger Form erstellt bzw. weitergegeben, so dass im Falle einer Weiterbearbeitung einer zuvor bereits bearbeiteten Problemstellung durch andere Personen die gleichen Daten noch einmal erhoben und verarbeitet werden müssen. Auch ist festzustellen, dass die verarbeitete Datenmenge mit der Zeit immer größer wird und somit die Datenverarbeitung immer aufwendiger. Weiterhin kommt es bei einer „normalen“ Datenhaltung in unterschiedlichen Dateien immer häufiger zu redundanter Datenhaltung und Datenverlusten.

Dies stellt die Rahmenbedingungen für die Erstellung eines Grundwassermanagementsystems dar. Auf deren Basis wird mit der Behandlung der Grundlagen und Entwicklungen der jeweiligen Teilsysteme Datenbanksystem, Geographisches Informationssystem und Numerisches Grundwassermodell eine Betrachtung durchgeführt, welche Software-Produkte bei den jeweiligen Teilsystemen möglich sind und welche in ein optimales Konzept für ein Grundwassermanagementsystem passen. Die jeweiligen Komponenten müssen nach Vorgabe des Autors auf einem Standard-Windows-PC lauffähig sein. Dies basiert auf der Annahme, dass ein entsprechendes Grundwassermanagementsystem in die normale Systemumgebung eines „Standard-Benutzers“ eingebaut werden kann bzw. diese Möglichkeit vorrangig sein sollte. Aufbauend auf den oben genannten Erkenntnissen wird das Grundwassermanagementsystem entwickelt.

Anhand des regionalen Beispiels für das Gewinnungsgebiet Queckborn wird die Erstellung eines Grundwassermanagements aufgezeigt. Mit der Entwicklung eines ersten konzeptuellen hydrogeologischen Modells zeigt sich, dass die Bearbeitung des Gebietes des gesamten westlichen Vogelsberges notwendig ist, um ein hydrogeologisch plausibles Modellgebiet zu erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass zum ersten Mal ein flächendeckendes hydrogeologisches Modell für die Grundwasserstockwerksgliederung für den gesamten westlichen Vogelsberg entwickelt wird.

Auf der Grundlage des Hydrogeologischen Modells werden alle relevanten Daten innerhalb des Untersuchungsgebietes gesammelt und aufbereitet. Mit Hilfe der Kopplung des Geographischen Informationssystems und der Grundwasserdatenbank werden die Grundlagen für die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells für das Untersuchungsgebiet gebildet. Es erfolgt eine optimale Kombination, Abstimmung und Anpassung der Teilkomponenten des Grundwassermanagementsystems mit Hilfe der Abfragesprache SQL und der Programmiersprachen AVENUE und Visual Basic for Applications. Dabei werden die Teilkomponenten Microsoft Access 2000, ArcView GIS 3.3 und GMS 6.0 verwendet. Microsoft Access stellt mittlerweile die Standard-Datenbanksoftware auf der Windows-Systemumgebung dar und auch ArcView GIS ist das am weitesten verbreitete Geographische Informationssystem im (hydro-)geologischen Bereich, was die Anwendung der Benutzer für einen ersten Einstieg erleichtert. Beide Produkte bieten alle Möglichkeiten, die für die Integration in ein

Grundwassermanagementsystem notwendig sind. GMS 6.0 wurde unter anderem aufgrund der angebotenen Möglichkeiten ausgewählt. Es stellt zusammen mit ArgusOne und FEFLOW die Grundwassermodellierungssoftware mit den größten GIS-Kopplungsmöglichkeiten dar. ArgusONE und GMS bieten zusätzlich zu den GIS-Kopplungsmöglichkeiten das gleichzeitige Prä- und Postprocessing von Finite-Differenzen-Modellen und Finite-Elemente-Modellen an.

Die Kopplung der drei Teilkomponenten eines Grundwassermanagementsystems bietet eine Reihe von Vorteilen, was sich am Beispiel des Gewinnungsgebietes Queckborn sehr gut zeigen lässt. Mit Hilfe des Grundwassermanagementsystems findet nur einmal eine recht aufwendige Datenersterfassung statt. Alle erfassten Daten liegen bei Vermeidung von Datenredundanz dauerhaft vor. Der Datenbestand muss nur durch den Import von neuen Daten gepflegt werden. Mit Hilfe von vorgefertigten Dokumentationsdefinitionen lassen sich für die vorgeschriebenen wasserwirtschaftlichen Jahresberichte und landschaftsökologischen Statusberichte die notwendigen Anlagen ohne großen Zeitaufwand erstellen. Mit der Analyse von raumbezogenen Zusammenhängen durch Verschneidung von Daten (Gewinnung neuer Daten aus bereits bestehenden Informationen) lassen sich z.B. landschaftsökologische Veränderungen im Raum erkennen und nicht nur an ausgewählten Beobachtungsstellen. Mit Hilfe der Modellergebnisse lassen sich aktuelle und potentielle Grundwasserflurabstandskarten erstellen. Durch die GIS-gestützte Einbeziehung der Biotoptypenkarte lassen sich die aktuelle und potentielle Förder- bzw. Grundwasserstandssituation dokumentieren und hydrogeologisch-ökologisch bewerten. Dies zeigt nur einen kleinen Ausschnitt der Möglichkeiten der Grundwasserüberwachung und ökologischen Beweissicherung, die sich durch den Einsatz eines entsprechenden Grundwassermanagementsystems bieten. Es stellt ein optimales Instrument auch schon für mittelgroße Wasserversorger dar.

Mit der vermehrten Nutzung des Internets kommen hier noch weitere Möglichkeiten hinzu, die bisher noch nicht in das Grundwassermanagementsystem integriert wurden. ArcIMS als Beispiel bietet die Möglichkeit, Teile eines solchen Grundwassermanagementsystems auch über das Internet zur Verfügung zu stellen. Hierbei könnten z.B. vorhandene Informationen innerhalb des Geographischen Informationssystems oder auch der Zugriff auf die Grundwasserdatenbankkomponente z.B. zum Erstellen von Grundwasserganglinien ermöglicht werden. Hier wird ein großes Zukunftspotential des entwickelten

Grundwassermanagementsystems aufgrund der Tatsache gesehen, dass die Internet-Nutzung und auch das Informationsinteresse der Bürger an der Qualität des Trinkwassers und an der Umwelt immer mehr zunimmt.

7 Literaturverzeichnis

ALBERTSON, P.E. & HENNINGTON, G.W. (1996): Groundwater analysis using a Geographic Information System following finite-difference and –element techniques.- *Engineering Geology* **42**: 167 – 173.

AHU – BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH IN ZUSAMMENARBEIT MIT PAULSON & RASCHKIN (1993): Übergreifendes Gutachten zur Wassergewinnung im Vogelsberg.- Gutachten i.A. der Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten; Aachen.

AHU – BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH IN ZUSAMMENARBEIT MIT PAULSON & RASCHKIN (1995): Umsetzung der umweltschonenden Grundwassergewinnung im Vogelsberg. Leitfaden zur Durchführung der Untersuchungen im Rahmen von Wasserrechtsanträgen.- Gutachten i.A. der Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten; Aachen.

ALBRECHT, F. (1962): Die Berechnung der natürlichen Verdunstung (Evapotranspiration) der Erdoberfläche aus klimatologischen Daten.- *Ber. Dt. Wetterdienst* **83**: 1 – 19; Offenbach.

ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. (1992): Applied groundwater modelling: Simulation of Flow and Advective Transport.- Academic Press Inc.: 381 S.; San Diego.

ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG DER FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate.- *Geol. Jb.* **C 19**: 3 – 98; Hannover.

ARMBRUSTER, V., LEIBUNDGUT, C. & MENZEL, L. (2000): Modellierung der detaillierten Grundwasserneubildung im Lockergestein mit einem SVAT-Modell.- *Wasser & Boden* **52/11**: 24 – 28; Berlin.

ASCHENBRENNER, F. (1991): Theoretische Untersuchungen zur numerischen Berechnung der Grundwasserströmung in einem Fluß-Aquifer System unter besonderer Berücksichtigung der ungesättigten Zone.- *Giessener Geologische Schriften* **44**: 214 S.; Gießen.

ASCHENBRENNER, F., KNOBLICH, K. & PFLUG, H.J. (1999): Anwendung von automatischen Parameterschätzverfahren für 3-dimensionale Grundwassermodelle.- *Giessener Geologische Schriften* **68**: 51 S.; Gießen.

BARTELME, N. (1988): GIS-Technologie: Geoinformationssysteme, Landinformationssysteme und ihre Grundlagen.- Springer Verlag: 280 S. ; Berlin, Heidelberg, New York.

BARTELME, N. (1995): Geoinformatik: Modell, Strukturen, Funktionen.- Springer Verlag: 414 S. ; Berlin, Heidelberg, New York.

BECKER, A. & BRAUN, P. (1999): Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling.- *Journal of Hydrology* **217**: 239 – 252.

BEER, S. & SPIES, K.-H. (2001): Geographische Informationssysteme in der Wasserwirtschaft.- *KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* **48/12**: 1775 – 1776; Hennef.

- BENOSKY, C.P. & MERRY, C.J. (1995): Automatic extraction of watershed characteristics using spatial analysis techniques with application to groundwater mapping.- *Journal of Hydrology* **173**: 145 – 163.
- BOETTCHER, R., WEISSHAUPT, R., FREISTÜHLER, E. & KÖNGETER, J. (1996): Entwicklung eines GIS-basierten Informationssystems für die effiziente Handhabung gewässerbeschreibender Informationen.- *Wasser & Boden* **9/1996**: 55 – 58; Berlin.
- BONHAM-CARTER, G.F. (1994): *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS.- Computer Methods in the Geosciences Vol. 13*: 398 S.; Ontario.
- BOY, S., HÄFNER, F., HOTH, N. & WILSNACK, T. (2001): Numerische Simulation dichtebeeinflusster und reaktiver Stofftransportprozesse im Grundwasser.- *Grundwasser* **1/2001**: 15 – 22; Berlin/Heidelberg.
- BRIECHLE, D. & BUCHER, B. (1998): Geographisches Informationssystem – ein Instrument für die Wasserversorgung.- *gwf – Wasser/Abwasser* **139/13**: 10 – 14; München.
- BUCHER, B., FRIEDEHEIM, E., LEVACHER, D. & WOLF-SCHUMANN, U. (1997): Berechnung der Neubildungsraten mit einem Wasserbilanzmodell zur verbesserten Grundwassersimulation.- *Wasser & Boden* **9/1997**: 29 – 42; Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2003): *Hydrologischer Atlas von Deutschland.- Berlin*.
- CHEN, P.P.-S. (1976): The Entity-Relationship Model – towards a unified View of Data.- *ACM Transactions on Database Systems* **1**: 9 - 36.
- CHIANG, W.-H., & KINZELBACH, W. (2001): *3D-Groundwater Modeling with PMWIN.- Springer Verlag*: 346 S.; Heidelberg.
- CODD, E.F. (1970): A relational Model of Data for large shared Data Banks.- *Communications of the ACM* **13**: 377 - 387.
- COPPOCK, D.J. & RHIND, D.W. (1991): The History of GIS. In: MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M. & RHIND, D. (Ed.): *Geographical Information Systems.- Longman Scientific & Technical*.
- DISSE, M. (1996): Flächendetaillierte Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung.- *Wasser & Boden* **9/1997**: 43 – 48; Berlin.
- DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate.- *Geol. Jb.* **C 27**: 45 – 65; Hannover.
- DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1997): Grundwasserneubildung und ihre Ermittlung – eine Anmerkung zum Beitrag von HÖLTING: Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung – Eine kritische Anmerkung.- *Grundwasser* **2/1997**: 77 – 88; Berlin/Heidelberg.
- D'URSO, G., MENENTI, M. & SANTINI, A. (1999): Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management.- *Agricultural Water Management* **40**: 291 – 302.
- DVGW (2003): *Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten.- Entwurf Technische Regel W 107*: 28 S.; Bonn.

DVWK (1985): Voraussetzungen und Einschränkungen bei der Modellierung der Grundwasserströmung.- Merkblätter zur Wasserwirtschaft **206**: 27 S.; Hamburg, Berlin.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.- Merkblätter zur Wasserwirtschaft **238**: 135 S.; Bonn.

EHRENBERG, K.-H. ET AL. (1981): Forschungsbohrung im Hohen Vogelsberg (Hessen) – Bohrung 1 (Flösser Schneise), Bohrung 2/2a (Hasselborn).- Geol. Abh. Hessen **81**: 97 - 135; Wiesbaden.

EHRENBERG, K.-H. & HICKETHIER, H. (1985): Die Basaltbasis im Vogelsberg.- Geol. Jb. Hessen **113**: 97 – 135; Wiesbaden.

ENGEL, F. & HÖLTING, B. (1970): Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse und die Erschließung des Grundwassers der Wasserwerke Stadt Allendorf und Wohratal (Landkreis Marburg).- Wasser & Boden **5/1970**: 105 – 111; Berlin.

ENGLERT, A., HASHAGEN, U., JAEKEL, U., NITZSCHE, O., SCHWARZE, H. & VEREECKEN, H. (2000): Transport von gelösten Stoffen im Grundwasser – Untersuchungen am Testfeld Krauthausen.- Grundwasser **3/2000**: 115 – 124; Berlin/Heidelberg.

ERDOGAN, Y. (2001): GIS-gestütztes Ressourcenmanagement in der Wasserversorgung.- Energie Wasser Praxis **2/2001**: 20 – 21; Bonn.

FRANKE, M. (1995): Zur Integration zeitdynamischer Modelle in GIS im Rahmen landschaftsökologischer Raumanalysen. In: BUZIEK, G.(Hrsg.): GIS in Forschung und Praxis.- Vermessungswesen **29**: 183 - 193; Verlag Konrad Witwer, Stuttgart.

FRIEDRICH, K. (1993): Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung Digitaler Höhenmodelle für ein Bodeninformationssystem in Hessen.- Geol. Jb. Hessen **121**: 151 – 168; Wiesbaden.

GARG, N.K. & ALI, A. (2000): Groundwater management for Lower Indus Basin.- Agricultural Water Management **42**: 273 – 290.

GÄßNER, H. & WILLAND, A. (2003): Altlasten-, Flussgebiets- und Grundwassermanagement am Beispiel des Ökologischen Großprojekts Bitterfeld-Wolfen.- Wasser & Boden **55 1+2/2003**: 43 – 48; Berlin

GEONORM (1994): Hydrogeologische Untersuchungen Reiskirchen – AZ 755-93; Gießen.

GRAF, H. & SCHÄFER, W. (2002): Simulation des Nitrattransports im Einzugsgebiet eines Wasserwerkes.- Grundwasser **4/2002**: 233 – 242; Berlin/Heidelberg.

GRIMM-STRELE, J. (2001): Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit in Baden-Württemberg.- Arb.-H. Wasser **2001/1**: 59 – 63; Hannover.

GÖPFERT, W. (1991): Raumbezogene Informationssysteme: Grundlagen der integrierten Verarbeitung von Punkt-, Vektor- und Rasterdaten, Anwendungen in Kartographie, Fernerkundung und Umweltplanung.- 318 S.; Wichmann Verlag, Karlsruhe.

GROSSMANN, J. (1996): Eingangsdaten und Parameter zur Berechnung der Grundwasserneubildung mit einem Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell.- DGM **40**: 204 – 211; Koblenz-Lützel.

GROSSMANN, J. & LANGE, F. (1999): Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.- *Grundwasser* **1/1999**: 11 – 17; Berlin/Heidelberg.

GROSSMANN, J. (2001): Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag – Programmdokumentation der EXCEL-Applikationen zur Berechnung des Sickerwasserabflusses aus Niederschlag und zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag.- 33 S.; Hamburger Wasserwerke GmbH, Hamburg.

GRÜNEWALD (1948): Die Entstehung des Gießener Wasserwerks in Queckborn.- Abschrift aus der Pfarrchronik der Evangelischen Pfarrei Queckborn (Pfarrer Ludwig Franz): 32 S.; Queckborn.

GUDERA, T, LANG, U. & RAUSCH, R. (2002): Modellierung des regionalen Grundwasserhaushalts für das Gebiet der Heilbronner Mulde.- *Grundwasser* **4/2002**: 224 – 232; Berlin/Heidelberg.

GÜNTHER, O. (1998): Environmental Information Systems.- Springer Verlag: 244 S. ; Berlin, Heidelberg, New York.

HAHN, H. J. & FRIEDRICH, E. (1999): Brauchen wir ein faunistisch begründetes Grundwassermonitoring, und was kann es leisten.- *Grundwasser* **4/1999**: 147 – 154; Berlin/Heidelberg.

HANAUER, B. (1982): Hydrogeologische und geohydraulische Untersuchungen im oberen Niddatal (Hessen) unter besonderer Berücksichtigung statistischer Methoden.- *Giessener Geologische Schriften* **32**: 161 S.; Gießen.

HANAUER, B. & SÖLL, T. (1996): Grundwasserbilanzmodell Benker Sandstein in Mittelfranken/Bayern.- *Grundwasser* **3-4/1996**: 113 – 120; Berlin/Heidelberg.

HARBAUGH, A.W. & McDONALD, M.G. (1996a): 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**: 56 S.; Reston, Virginia.

HARBAUGH, A.W. & McDONALD, M.G. (1996b): 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**: 220 S.; Reston, Virginia.

HAUDE, W. (1952): Verdunstungsmenge und Evaporationskraft eines Klimas.- *Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone* **42**: 225 – 229; Bad Kissingen.

HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration.- *Mitt. Dt. Wetterdienst* **1**, 8: 1 – 22; Bad Kissingen.

HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise.- *Mitt. Dt. Wetterdienst* **2**, 11: 1 – 24; Bad Kissingen.

HEINRICH, B. & KERN, F.-J. (2000): Hydrologische Informationssysteme für Umweltverwaltung, Wasserwirtschaft und Forschung auf Bundes- und Länderebene.- *Wasser & Boden* **3/2000**: 4 – 8; Berlin.

HERMSMEYER, D. & VAN DER PLOEG, R. R. (1995): GIS-gestützte Modellierung des winterlichen Nitratauswaschrisikos aus landwirtschaftlich genutzten Böden eines Bundeslandes. In: BUZIEK, G.(Hrsg.): GIS in Forschung und Praxis.- *Vermessungswesen* **29**: 194 - 208; Verlag Konrad Witwer, Stuttgart.

HERZOG, F., KUNZE, J., WEILAND, M. & VOLK, M. (2001): Modellierung der Grundwasserneubildung im Lockergesteinsbereich Mitteldeutschlands.- Wasser & Boden **53/3**: 32 – 36; Berlin.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1989): Bodenübersichtskarte von Hessen, M 1 : 500.000; Wiesbaden.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1989): Geologische Übersichtskarte von Hessen, M 1 : 300.000; Wiesbaden.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1997): Bericht zur Hydrogeologie des Vogelsberges, Stand: Dezember 1997.- 346 S.; Wiesbaden.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2003): Umweltatlas von Hessen.- <http://atlas.umwelt.hessen.de/>; Wiesbaden.

HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, JUGEND, FAMILIE UND GESUNDHEIT, WIESBADEN (1996): Die umweltschonende Wassergewinnung im Vogelsberg, Konzeption und Leitfaden zur Umsetzung, Kurzfassung (WG 1-1); Wiesbaden.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1993): Hydrogeologische Untersuchungen am Wasserwerk Queckborn; Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1994): Hydrogeologische und landschaftsökologische Untersuchungen im Bereich des Wasserwerkes Queckborn; Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1995): Ergänzende hydrogeologische und landschaftsökologische Untersuchungen Bereich Wasserwerk Queckborn 9/95; Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1996): Hydrogeologische und ökologische Untersuchungen 1996 im Bereich des Wasserwerkes Queckborn; Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1997): Risikoanalyse für den Absenkungsbereich des Wassergewinnungsgebietes Queckborn; Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND GEOHYDRAULIK GMBH (1998): Wasserwerk Queckborn, Dokumentation der ergänzenden hydrologischen Untersuchungen (Einrichtung der GwMessstellen GWM BG 3 flach und tief); Lich.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (1999): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 1998; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (1999): GWMS Hydrogeologie / Landschaftsökologie WW Queckborn – Dokumentation und Programmbeschreibung (Stand 12/99); Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2000): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 1999; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2001): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2000; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2002): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2001; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2002): Stadtwerke Gießen – Fördergebiet Queckborn, Landschaftlicher Statusbericht 2001; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2003): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2002; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2003): Gewinnungsgebiet Queckborn, Prognose des Voreingriffszustandes; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2004): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2003; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2005): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2004; Gießen.

HG BÜRO FÜR HYDROGEOLOGIE UND UMWELT GMBH (2006): Stadtwerke Gießen - Fördergebiet Queckborn, Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2005; Gießen.

HÖLTING, B. (1971): Wassererschließung im schwebenden Grundwasserstockwerk (Brunnenbohrung der Gemeinde Stumpertenrod/Kr. Alsfeld).- Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforschung **99**: 341 – 346; Wiesbaden.

HÖLTING, B. (1977): Bemerkungen zur Herkunft der Salinarwässer am Taunusrand.- Geol. Jb. Hessen **105**: 211 – 221; Wiesbaden.

HÖLTING, B. (1981): Vorkommen und Verbreitung von tiefen Grundwässern des Na₂-SO₄-Typs in Hessen.- Geol. Jb. Hessen **109**: 139 – 146; Wiesbaden.

HÖLTING, B. (1985): Gedanken zur Geohydraulik von Mineralwässern in Hessen.- Geol. Jb. Hessen **113**: 145 – 150; Wiesbaden.

HÖLTING, B. (1992): Ökologische Aspekte der Grundwassergewinnung in der Bundesrepublik Deutschland.- gwf Wasser/Abwasser **133/12**: 609 – 614; München.

HÖLTING, B., HAERTLE, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K. H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W. & WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.- Geol. Jb. **C63**: 5 – 24; Hannover.

HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie.- Ferdinand Enke Verlag: 440 S.; Stuttgart.

HÖLTING, B. & REICHMANN, H. (1996): Grundwasser - Grundwasserneubildung.- Wasser & Boden **10/1996**: 22 – 24; Berlin.

HÖLTING, B. (1997): Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung – Eine kritische Anmerkung.- Grundwasser **1/1997**: 34 – 35; Berlin/Heidelberg.

HÖLTING, B. (1997): Stellungnahme zur Erwidern von DÖRHÖFER & JOSOPAIT.- Grundwasser **2/1997**: 81 – 82; Berlin/Heidelberg.

- HUNTON, P.W. (1974): Finite difference methods as applied to the solution of groundwater flow problems.- Wyoming Water Resources Research Institute, University of Wyoming: 108 S.; Laramie, Wyoming.
- JOHANNESSON, K.H., STETZENBACH, K.J. & HODGE, V.F. (1997): Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing.- *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61/17**: 3605 – 3618.
- JUNGBAUER, H., HANSTEIN, P., BRODBECK, M., BRUNS, M., FRISCH, H., FRITSCH, P., HANAUER, B., HOFFMANN, E.-W., KÖLLING, C. KOSCHEL, G., LIBERTY, S., MIKAT, H., MIKULLA, C., OSWALD, T. RIEGGER, J. RIETZLER, J., SCHÖPFER, C., TRACK, T., TÜRK, T. & WOHNLICH, S. (1999): Hydrogeologische Modelle – Ein Leitfaden für Auftraggeber, Ingenieurbüros und Fachbehörden in der Grundwasserwirtschaft.- *gwf – Wasser/Abwasser* **140/11**: 781 – 786; München.
- KAISER, G. (1976): Hydrogeologische Untersuchungen im Niederschlagsgebiet der Ohm (Hessen).- *Giessener Geologische Schriften* **10**: 210 S.; Gießen.
- KAPPAS, M. (2001): Geographische Informationssysteme.- *Das Geographische Seminar*: 315 S.; Braunschweig.
- KEMPER, A. & EICKLER, A. (1999): Datenbanksysteme – Eine Einführung.- R.Oldenbourg Verlag: 615 S.; München, Wien.
- KIM, J.-M. & PARIZEK, R.R. (1997): Numerical simulation of the Noordbergum effect resulting from groundwater pumping in a layered aquifer system.- *Journal of Hydrology* **202**: 231 – 243.
- KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1995): Grundwassermodellierung.- Gebrüder Bornträger: 283 S.; Berlin, Stuttgart.
- KIPP, K.L. (1987): HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems.- U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report, **86-4095**: 517 S.; Denver, Colorado.
- KIRNBAUER, R. & STEIDL, R. (1995): Abflusentstehung auf unterschiedlichen Böden.- *Wasser & Boden* **47/8**: 17 – 21; Berlin.
- KLAASSEN, S. & SCHEELE, B. (1996): Modellierung der potentiellen Grundwasserneubildung mit einem GIS.- *Wasser & Boden* **10/1996**: 25 – 28; Berlin.
- KLIMA VON HESSEN (1981-85): Bearb. Deutscher Wetterdienst Offenbach, M. Kalb u.a. .- 115 S.; Wiesbaden.
- KNOBLICH, K. & KAVIANY, E. (1980): Vergleichende Wasserhaushaltsuntersuchungen im Niederschlagsgebiet der Lahn.- *Techn. Mitt.* **73 Jg. H. 2**: 95 – 100; Essen.
- KNOBLICH, K., BECKER, K.C. & OBERMANN, K.F. (1976): Durchlässigkeitsbestimmungen mit verschiedenen Methoden am Beispiel eines Auelehms.- *Z. angew. Geowiss.* **H. 8**: 5 – 17.
- KUGELE, H., STEGMAIER, A., MÜLLER, R., THIELE, T., BARNIKEL, G., FISCHER, M. & HAASE, M. (2002): GIS-GwD: Praxisgerechte GIS-Anwendungen für die Gewässerdirektion in Baden-Württemberg.- *Wasserwirtschaft* **10/2002** 31 – 34; Wiesbaden.

- LARABI, A. & DE SMEDT, F. (1997): Numerical solution of 3-D groundwater flow involving free boundaries by a fixed finite element method.- *Journal of Hydrology* **201**: 161 – 182.
- LASSERRE, F., RAZACK, M. & BANTON, O. (1999): A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater.- *Journal of Hydrology* **224**: 81 – 90.
- LEISMANN, M. & MEON, G. (2002): Das Modell MeadFlow für die praxisgerechte 2D-Modellierung von Strömungen in Flusslandschaften.- *Wasserwirtschaft* **6/2002** 40 – 44; Wiesbaden.
- LEMPERT, M., OSTROWSKI, W. & MÜLLER, H. (1994): Die Berechnung des Oberflächenabflusses auf Grundlage digitaler Höhenmodelle.- *Wasser & Boden* **11/1994**: 49 – 54; Berlin.
- LEßMANN, B., SCHARPFF, H.-J. & WIEGAND, K. (1998): Hydrogeologische Untersuchung des komplexen Kluftgrundwasserleitersystems Vogelsberg (Hessen) im Hinblick auf eine umweltschonende Grundwasserbewirtschaftung.- *Terra Nostra* **98/3**: V206; Berlin.
- LEßMANN, B. & WIEGAND, K. (1998): Der vulkanische Vogelsberg als Beispiel für ein mehrschichtiges Grundwasserstockwerkssystem.- *Geol. Jb. Hessen* **126**: 81 – 92; Wiesbaden.
- LEßMANN, B. (1999): Zur Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges: Hydrogeologische, hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchung eines mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystems.- *Dissertation TH Darmstadt*: 297 S.; Darmstadt.
- LEßMANN, B., SCHARPFF, H.-J., WEDEL, A. & WIEGAND, K. (2000): Grundwasser im Vogelsberg.- Broschüre des Hess. Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten und des Hess. Landesamtes für Umwelt und Geologie: 31 S.; Wiesbaden.
- LEßMANN, B., WIEGAND, K. & SCHARPFF, H.-J. (2001): Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges.- *Geol. Abh. Hessen* **108**: 144 S.; Wiesbaden.
- LEßMANN, B. (2001): Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen an Grundwässern aus dem Vulkangebiet Vogelsberg.- *Grundwasser* **2/2001**: 81 – 85; Berlin/Heidelberg.
- LIGGETT, J.A. (1984): *Stream-Aquifer Interaction*.- School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University: 70 S.; Ithaca, New York.
- LIN, H.-C.J., RICHARDS, D. R., TALBOT, C.A., YEH, G.-T. CHENG, J.-R., CHENG, H.-P. & JONES, N.L.. (2001): FEMWATER: A Three-dimensional Finite Element Computer Model for Simulating of Density-dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media Version 3.0.- US Army Engineer Research and Development Center: 87 S.; Vicksburg.
- LOGAN, J. (1964): Estimating Transmissibility from Routine Production Tests of Water Wells.- *Ground Water* **2**: 35 – 37.
- MATTHESS, G. (1970): Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen.- *Abh. hess. L.-Amt Bodenforschung* **58**: 105 S.; Wiesbaden.
- MATTHESS, G. & THEWS, J.-D. (1963): Der Abflusszuwachs als Hilfsmittel bei der Beurteilung von Wassererschließungsmöglichkeiten.- *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforschung* **91**: 231 – 236; Wiesbaden.

- MCDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. (1984): A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.- U.S. Geological Survey Open-File Report **84-875**: 528 S.; Reston, Virginia.
- MCDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. (1988): A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.- Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS), Book **6**, Chapter **A1**: 586 S.; Denver, Colorado.
- MCKEOWN, C., STUART HASZELDINE, R. & COUPLES, G.D. (1999): Mathematical modelling of groundwater flow at Sellafield, UK.- Engineering Geology **52**: 231 – 250.
- MERTIN, V. (2001): GIS als zentraler Bestandteil einer unternehmensweiten Informationstechnologie.- Energie Wasser Praxis **2/2001**: 12 – 16; Bonn.
- MÜLLER, R., BARNIKEL, G., HAASE, M., TOCHTERMANN, K. & RAIBER, A. (2001): GIS-basiertes Auskunftssystem für geoökologische Untersuchungen am Beispiel der Polder Altenheim (Oberrhein).- Wasser und Abfall **10/2001**: 46 – 50; Düsseldorf.
- NUJIC, M. (2002): Diskussion zum Aufsatz "Das Modell MeadFlow für die praxisgerechte 2D-Modellierung von Strömungen in Flusslandschaften" von M. Leismann und G. Meon in Wasserwirtschaft, Heft 6/2002, S. 40 - 44.- Wasserwirtschaft **10/2002** 44 – 47; Wiesbaden.
- O'CONNELL, P.E. & TODINI, E. (1996): Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview.- Journal of Hydrology **175**: 3 – 16.
- OSTROWSKI, M.W. (1992): Ein universeller Baustein zur Simulation hydrologischer Prozesse.- Wasser & Boden **11/1992**: 755 – 760; Berlin.
- PETH, U. & PETIG, R. (2001): Anwendung von Homogenisierungs- und Transformationsverfahren.- Energie Wasser Praxis **2/2001**: 22 – 25; Bonn.
- PLÜMACHER, J. & UFRICHT, W. (2000): Grundwasserbilanzmodell Benker Sandstein in Mittelfranken/Bayern.- Grundwasser **1/2000**: 3 – 8; Berlin/Heidelberg.
- RENGER, M. & STREBEL, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften.- Wasser & Boden **8/1980**: 362 – 366; Berlin.
- RENGER, M. & STREBEL, O. (1980): Berechnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden.- Wasser & Boden **12/1980**: 572 – 575; Berlin.
- RENGER, M., WESSOLEK, G., KÖNIG, R. SWARTJES, F. & KASCHANIAN, B. (1990): Modelle zur Ermittlung und Bewertung von Wasserhaushalt, Stoffdynamik und Schadstoffbelastbarkeit in Abhängigkeit von Klima, Bodeneigenschaften und Nutzung. Forschungsbericht der KFA-Jülich 138 S.
- RICHTER, J., DUTELOFF, T. & FELIX, M. (2001): Das Fachinformationssystem Hydrogeologie im Umweltinformationssystem Sachsen – Stand und praktische Anwendung.- Grundwasser **3/2001**: 123 – 130; Berlin/Heidelberg.
- RINGROSE, S., VANDERPOST, C. & MATHESON, W. (1998): Evaluation of vegetative criteria for near-surface groundwater detection using multispectral mapping and GIS techniques in semi-arid Botswana.- Applied Geography **18/4**: 331 – 354.

- ROTHE, B., WOLF-SCHUMANN, U., SCHITTHELM, D. & BÜRCEL, B. (2002): Regionalisierungsverfahren zur Ermittlung des potenziell natürlichen jährlichen Abflusses in kleinen Einzugsgebieten.- Wasser und Abfall **6/2002**: 14 – 19; Düsseldorf.
- ROUSAKIS, S. (1979): Hydrogeologie und Wasserhaushalt im Niederschlagsgebiet der Wetter (Hessen).- Giessener Geologische Schriften **21**: 216 S.; Gießen.
- RUHE, C. (1995): Einsatz eines GIS zur großräumigen Beschreibung des Stoffhaushaltes im Grundwasser. In: BUZIEK, G.(Hrsg.): GIS in Forschung und Praxis.- Vermessungswesen **29**: 170 - 182; Verlag Konrad Witwer, Stuttgart.
- RULAND, P. & ROUVÉ, G. (1995): Objektorientierte geographische Informationssysteme im Wasserbau.- Wasser & Boden **8/1995**: 22 – 25; Berlin.
- SACHER, H. & NAUJOKS, C. (1998): Berechnung von Überschwemmungsgebietsgrenzen mittels modernster Modelltechnik.- Wasser & Boden **1/1998**: 5 – 10; Berlin.
- SACHER, H. & DORP, M. (1998): Erfahrungen bei der Anwendung von Gebietsniederschlagsmodellen.- Wasser & Boden **8/1998**: 11 – 14; Berlin.
- SALAMA, R.B., YE, L. & BROUN, J. (1996): Comparative study of preparing hydraulic head surfaces and the introduction of automated hydrogeological-GIS techniques.- Journal of Hydrology **185**: 115 – 136.
- SANFORD, W.E. & KONIKOW, L.F. (1985): A two-constituent solute-transport model for ground water having variable density.- U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report, **85-4279**: 88 S.; Denver, Colorado.
- SCHARPFF, H.-J. (1974): Verbreitung und Dynamik der mineralwasserbeeinflussten Grundwässer der Wetterau/Hessen.- Abh. Hess. L.-Amt Bodenforschung **70**: 103 – 158; Wiesbaden.
- SCHENK, E. (1968): Über den Wasserhaushalt des basaltischen Paläovulkans Vogelsberg in Hessen.- Steirische Beiträge zur Hydrogeologie **20**: 23 – 50; Graz.
- SCHMIDT, A. (1992): Die basaltischen Grundwasserleiter im westlichen Vogelsberg (Hessen) und deren Stockwerksgliederung.- Dissertation TH Darmstadt: 178 S.; Darmstadt.
- SCHMIDT, G. (1996): Informationsmanagement – Modell Methoden Techniken.- 181 S.; Berlin - Heidelberg.
- SCHOTTLER, W. (1937): Der Vogelsberg.- Notizbl. hess. geol. L.-Anst. **18**: 3 – 86; Darmstadt.
- SCHREIBER, P. (1998): Grundwasserüberwachung und Monitoring.- gwf Wasser/Abwasser **139/13**: 15 – 20; München.
- SCHRICKE ET AL. (1975): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1 : 25.000, Blatt Nr. 5319 Londorf.- 192 S.; Wiesbaden.
- SCHUBACH, K. (1952): Wasserhaushaltsuntersuchungen an verschiedenen Bodenarten unter besonderer Berücksichtigung der Verdunstung.- Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone **40**: 1 – 14; Bad Kissingen.

SIEKER, H. (1996): Management von Wasserressourcen - Kurs WW 50; Kapitel 10: EDV-gestützte Management-Instrumente.- Kursunterlagen Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.

STEGEMANN, W. (1964): Paläontologie und Stratigraphie einiger Sedimentvorkommen im Vogelsberg.- Ber. Oberhess. Ges. Natur- u. Heilkde. Gießen, naturwiss. Abt., **33**, 4: 251 – 279; Gießen.

STOLWIJK, N.H.M., ZIJL, W. & BOEKELMAN, R. (1996): The penetration depth in modelling natural groundwater flow.- Journal of Hydrology **185**: 171 – 182.

TALBOT, W.R. & KOLM, K.E. (1996): Application of a step-wise, integrated method of characterizing hydrologic systems using GIS: A site specific case study at an NPL site near Cheyenne, Wyoming.- Engineering Geology **42**: 139 – 153.

THEISEN, H.-W., ELSÄßER, R. & RAMBOW, J. (2001): Ein GIS-basiertes Informationssystem für die Erstellung von Wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen.- Wasserwirtschaft **91/11** 542 – 547; Wiesbaden.

UHLIG, S. (1951): Die Untersuchung und Darstellung der Bodenfeuchte.- Ber. Dt. Wetterdienst US-Zone **30**: 3 – 24; Bad Kissingen.

UHLIG, S. (1954): Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten.- Mitt. Dt. Wetterdienst **1**, 6: 1 – 24; Bad Kissingen.

UHLIG, S. (1959): Wasserhaushaltsbetrachtungen nach THORNTHWAITTE.- Z. f. Acker- und Pflanzenbau **109**: 384 – 407; Berlin.

ULMER, D., FRIEDRICH, K. & ULMER, S. (1999): Das Hessische Erdinformationssystem (HEISS).- Geologie in Hessen **3**: 35 S.; Wiesbaden.

VAN EK, R., WITTE, J.-P.M., RUNHAAR, H. & KLIJN, F. (2000): Ecological effects of water management in the Netherlands: the model DEMNAT.- Ecological Engineering **16**: 127 – 141.

VAUGHAN, P.J. & CORWIN, D.L. (1994): A method of modeling vertical fluid flow and solute transport in a GIS context.- Geoderma **64**: 139 – 154.

WEDEPOHL, K.-H., GOHN, E. & HARTMANN, G. (1994): Cenozoic alkali basaltic magmas of western Germany and their products of differentiation.- Contrib. Mineral. Petrol **115**: 253 – 278; Berlin.

WEGEHENKEL, M. & SELG, M. (2002): Räumlich hochauflösende Modellierung der Grundwasserneubildung im Neckartal bei Tübingen.- Grundwasser **4/2002**: 217 – 223; Berlin/Heidelberg.

WEGELE, G. (2001): GIS in mittelgroßen Versorgungsunternehmen.- Energie Wasser Praxis **2/2001**: 17 – 18; Bonn.

WERNER, H., HUBER, P. & EINFALT, T. (1998): Wirkung der zeitlichen Auflösung von Niederschlagsaufschrieben auf hydrologische Modelluntersuchungen.- Wasser & Boden **50/3**: 53 – 55; Berlin.

WERNER, H. & SCHAFFMANN, B. (2001): Neue GIS-Anwendungen bei der Hydrologischen Modellierung.- Wasser und Abfall **5/2001**: 24 – 29; Düsseldorf.

WICKENKAMP, V., BEINS-FRANKE, A., MOSIMANN, T. & DUTTMANN, R. (1996): Ansätze zur GIS-gestützten Modellierung dynamischer Systeme und Simulation ökologischer Prozesse. In: DOLLINGER, F. & STROBL, J.(Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung VIII.- Salzburger Geographische Materialien **24**; Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Salzburg, Salzburg.

WIEGAND, K. (1977): Die geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse des Vogelsberges (Hessen).- Geol. Jb. Hessen **105**: 177 – 184; Wiesbaden.

WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A. & SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt: Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum; Veränderung durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik.- Parey: 352 S.; Berlin.

YEH, G.T. & WARD, D.S. (1979): FEMWATER: A finite-element Model of water flow through saturated-unsaturated porous media.- ORNL-5567, Oak Ridge National Laboratory: 162 S.; Oak Ridge, Tennessee.

ZHENG, C. & WANG, P.P. (1999): MT3DMS – a modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems.- Documentation and User`s Guide, Contract Report SERDP-99, U.S. Army Engineer Research and Development Center: 169 S.; Vicksburg, MS.