

11 Geodatenverarbeitung mit GIS bei der Grundwassermodellierung

11.1 Allgemeines

Regionale numerische Grundwasserströmungs- und Transportmodelle haben einen großen Geodatenbedarf beim Modellaufbau und bei der Kalibrierung. Nahezu alle Eingangs- und Ergebnisdaten solcher Modellierungen sind georeferenziert, das heißt, sie haben einen Raumbezug.

Diese Daten werden in der Regel im GAUß-KRÜGER-Koordinatensystem erhoben und auch kartographisch dargestellt. Sie kommen von den unterschiedlichsten Datenerzeugern und liegen in vielfältigen Datenformaten vor. Typische Datenerzeuger sind beispielsweise Vermessungsämter, geowissenschaftliche und wasserwirtschaftliche Verwaltungen, Umweltverwaltungen, Wasserwerksbetreiber und Ingenieurbüros. Typische Datenformate sind Vektordaten aus GIS- und CAD-Systemen, georeferenzierte Rasterdaten, Rasterbilddaten, Tabellen und analoge Kartengrundlagen. Die letztgenannten liegen in der Regel in unterschiedlichen Maßstäben vor.

Zeitabhängige Eingangs- und Ergebnisdaten (z. B. Druckhöhen, Entnahmeraten und Konzentrationen) werden zum Vergleich mit anderen Daten mit Datum und Uhrzeit erhoben und dargestellt. Grundwassermodelle verarbeiten die Modelldaten in der Regel in einem eigenen, lokalen Koordinaten- und Zeitsystem, das von dem der Eingangs- und Ergebnisdaten abweicht. Bei der Interpretation der Grundlagendaten und der Übergabe an die Rechenprogramme bestehen somit ein großer Harmonisierungsbedarf und die Notwendigkeit von Transformationen in unterschiedliche Referenzsysteme. Die Rechenergebnisse müssen wiederum mit topographischen und geowissenschaftlichen Ausgangsdaten verknüpft, beurteilt und dargestellt werden.

11.2 Hydrogeologisches Konzeptmodell

Regionale Grundwasserströmungs- und Transportmodelle sollen auf einem hydrogeologischen Konzeptmodell beruhen. Dieses beschreibt die hydrogeologischen Grundlagen des zu modellierenden Aquifers bzw. Aquifersystems. Im einzelnen handelt es sich dabei um:

- horizontale und vertikale Aquifergeometrien (laterale Begrenzung und Stockwerksbau von Grundwasserleitern und -geringleitern)
- geohydraulische Kennwerte der hydrogeologischen Einheiten

- Grundwasserzirkulation in den hydrogeologischen Einheiten, beschrieben durch Druckhöhenverteilungen (Grundwassermeßstellen und Gleichpläne)
- hydraulische Randbedingungen (Entnahme- und Schluckbrunnen, Aquiferbegrenzungen mit Grundwasserzustrom und -abstrom, ex- und infiltrierende Oberflächengewässer, flächendifferenzierte Grundwasserneubildung, Aus- und Zusickeung über Leakage)
- Grundwasserhaushaltsgrößen
- Stoffquellen und -senken
- Stoffverteilungen in den hydrogeologischen Einheiten (Grundwassermeßstellen und Isokonzentrationen)
- zeitliche Variationen der genannten Parameter.

Die Geometrien der genannten Größen werden in Karten, ihre Attribute und deren zeitliche Variation in Tabellen dokumentiert. Erfolgt die Dokumentation in analoger Form, entspricht dies einer konventionellen hydrogeologischen Karte. Die Beschreibung in digitaler Form entspricht typischerweise einem Datensatz in einem Geoinformationssystem.

11.3 GIS-Einsatz – warum ?

Bei einem Großteil der anfangs genannten Aufgabenstellungen vor und nach einer Grundwassermodellierung (Pre- und Postprocessing) handelt es sich um klassische GIS-Aufgaben:

- Fortschreibungsfähige Dokumentation von georeferenzierten Grundlagen- und Ergebnisdaten
- Maßstabsfreie Verwaltung und Integration von Geodaten unterschiedlichster Herkunft
- Konvertierung von Vektor-, Raster- und Bilddaten
- Transformation von Grundlagen- und Modelldaten in unterschiedliche Koordinaten- und Zeitsysteme sowie Maßeinheiten
- Verknüpfung von Eingangs-, Modell- und Ergebnisdaten mit topographischen Grunddaten
- Kartographische Ausgestaltung aller georeferenzierter Daten.

Für alle diese Anforderungen steht mit den heutigen GIS-Systemen eine leistungsfähige Technologie zur Verfügung. Die bekanntesten und verbreitetsten Modellierungsprogramme haben bereits Software-Umgebungen zum Pre- und Postprocessing, die standardisierte GIS-Schnittstellen aufweisen (DIERSCH 1993). Es gibt auch Lösungen, bei denen das gesamte Pre- und Postprocessing unter einem GIS integriert ist (NACHTNEBEL et al. 1993, SEBHAT et al. 1995). Häufig verfügen die Werkzeuge für das Pre-

und Postprocessing auch über CAD-Schnittstellen, über die Eingangs- und Ergebnisdaten mit GIS-Systemen ausgetauscht werden können (CHIANG et al. 1997). Darüber hinaus sind die internen Formate von GIS- und Modelldatensätzen in der Regel bekannt, so daß einer Eigenentwicklung von Schnittstellen nichts im Wege steht.

Geoinformationssysteme dienen als Geodatenspeicher und Datenmanager und werden seit Anfang der 90er Jahre weltweit routinemäßig zu diesem Zweck eingesetzt.

11.4 Datentypen

Die einzelnen Komponenten eines hydrogeologischen Konzeptmodells lassen sich mit den Daten-

typen eines topologisch-relationalen Vektor-GIS vollständig abbilden. Ein sogenanntes hybrides GIS, das Vektor- und Rasterdatentypen behandeln kann, ermöglicht auch die Konversion in Rasterdaten. Tab. 1 gibt eine Übersicht über Komponenten eines hydrogeologischen Konzeptmodells, der möglichen Repräsentation durch unterschiedliche Datentypen im GIS und Beispiele.

11.5 Datenfluß bei der Grundwassermodellierung mit FEFLOW

Derzeit kommen beim LGRB die Geoinformationssysteme ARC/INFO und ArcView zum Einsatz. Zu den am häufigsten verwendeten Simulatoren

Tab. 1: GIS-Datentypen, Komponenten eines Konzeptmodells und Beispiele

GIS-Datentyp	Komponente des Konzeptmodells	Beispiel
Punkt-Geometrien	Randbedingungen Parametererhebungen	Entnahme- und Schluckbrunnen, Druckhöhen in Meßstellen, hydraulische Kennwerte und Stoffgehalte in Meßstellen
Linien-Geometrien	Randbedingungen Isolinien von Parameterverteilungen Isolinien von Geometrien	Lateraler Zustromrand Druckhöhen im Oberflächen- gewässer Leakage-Koeffizienten des Gewässers Isolinie T-Wertverteilung Isolinie Aquiferbasis
Flächen-Geometrien	Randbedingungen diskrete Parameterverteilung Modellgeometrien	Grundwasseraustausch an der Aquifersohle und Aquiferdeckfläche Grundwasserneubildung k_f -Wertverteilung Modellgebiet im Grundriß Modellnetz
Tabellen	Attribute zu allen Geometrien Attribute in verschiedenen Dimensionen Zeitreihen	Brunnenentnahmeraten Druckhöhen in Meßstellen Zahlenwerte von Isolinien Neubildungsrate pro Teilfläche Entnahmeraten in [m^3/s] und [l/s] Druckhöhen, Entnahmeraten
Raster	Rasterwerte stetiger Verteilungen Rasterwerte diskreter Verteilungen georeferenzierte Bilder Modellgeometrien	Raster Aquiferbasis, T-Werte Raster Neubildung Topographische Karte Luftbild Modellraster

gehören FEFLOW, MODFLOW und ASM. Am Beispiel einer Grundwassermodellierung mit FEFLOW wird die Datenintegration und -haltung im GIS, die Übergabe der Geometrien und Attribute an den Simulator und die weitere Nutzung von Modellierungsergebnissen exemplarisch dargestellt (Abb. 45). Die Grundwasserströmungsmodellierung war Teil eines Untersuchungsprogramms zur Grundwasserbewirtschaftung im Singener Becken (Lkr. Konstanz). Dabei wurde das dreidimensionale Grundwasserfließ-

system in der quartären Lockergesteinsfolge stationär und instationär modelliert. Die geologischen Ausgangsdaten werden in der ADB verwaltet.

Aus den Rohdaten der Aufschlußdatenbank wurde ein hydrogeologisches Konzeptmodell erarbeitet. Die Geometrien und Parameter dieses Modells werden als Projektdaten im DKA gehalten. Die Geometrien (horizontale und vertikale Grenzen der Grundwasserleiter, Zwischenhorizonte und hydraulische Fen-

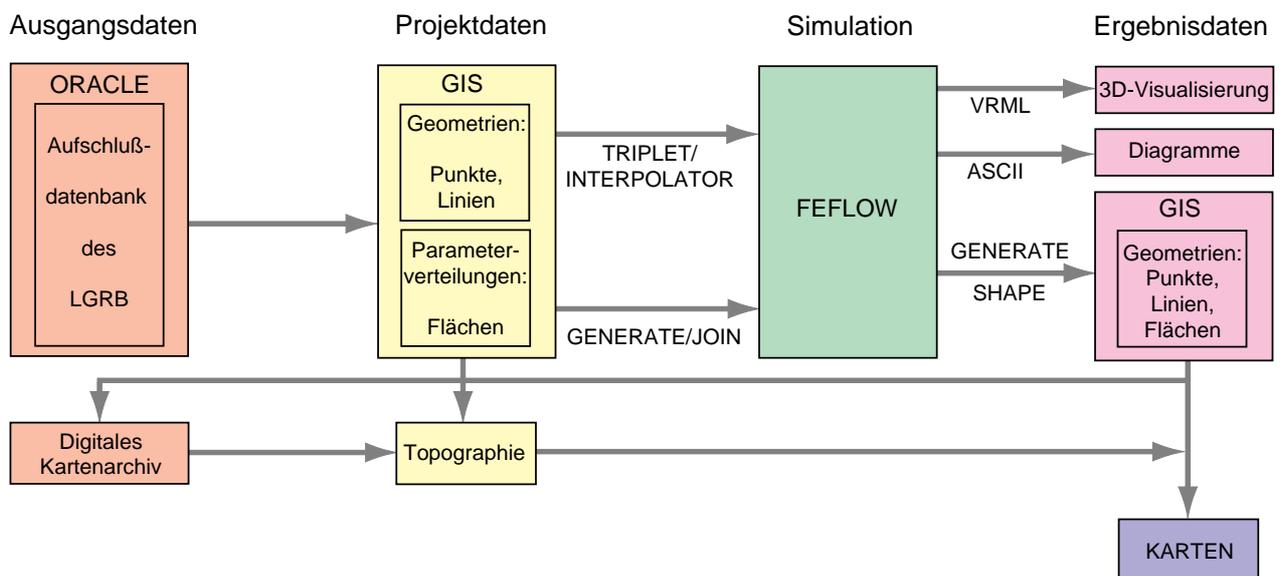


Abb. 45: Datenfluß bei der Grundwassermodellierung für das Singener Becken

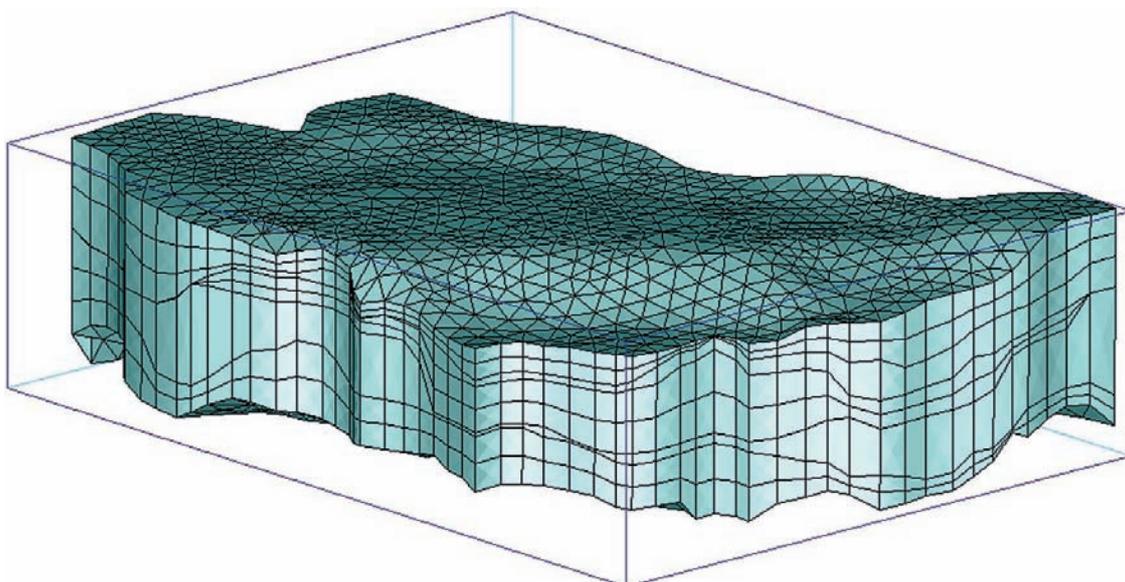


Abb. 46: Dreidimensionales Finite-Elemente-Netz mit neun Knotenebenen und acht Elementlagen. Die acht Elementlagen beschreiben die Mächtigkeit und Verbreitung der übereinanderliegenden Grundwasserleiter und Zwischenschichten, die teilweise lateral auskeilen. Die Kanten der Blockdarstellung sind an den Himmelsrichtungen ausgerichtet. Der Blick auf die dreidimensionale Blockdarstellung erfolgt von oben aus südöstlicher Richtung.

ster) liegen als Coverages mit Linien- und Flächen-topologie vor. Sie dienen dem Aufbau des dreidimensionalen Finite-Elemente-Netzes entweder in FEFLOW selbst oder mittels externer Werkzeuge (Abb. 46). Wird das Netz in FEFLOW erzeugt, erfolgt der Geometriedatenimport über Standardschnittstellen.

Bei den Parametern handelt es sich um hydraulische Kennwerte, die in den einzelnen hydrogeologischen Einheiten eine diskrete Verbreitung aufweisen. Diese ist im Raum Singen an sogenannte lithofazielle Einheiten gebunden (Abb. 47). Aufgrund von Pumpversuchsergebnissen konnte jeder lithofaziellen Einheit ein bestimmter Durchlässigkeitsbeiwert und Speicherkoeffizient zugewiesen werden. Grundwassergleichen für unterschiedliche Stichtage (Abb.

48) sind in Coverages mit Linientopologie abgelegt, die zugehörigen Druckhöhen, gemessen an Grundwassermeßstellen, in Coverages mit Punkttopologie. Zu den Attributen dieser Coverages gehören nicht nur die Zahlenwerte der Stichtagsmessungen, sondern alle Aufzeichnungen einer Ganglinie.

Geometrien und Zahlenwerte von Randbedingungen liegen ebenfalls in Coverages aller drei Topologietypen vor. Brunnenentnahmen werden punktförmig, Druckhöhen und Leakagekoeffizienten von Oberflächengewässern sowie laterale Zu- und Abflüsse linienförmig verwaltet. Die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag und die Leakagekoeffizienten der Sohlschicht der untersten hydrogeologischen Einheit sind als Flächen abgelegt.

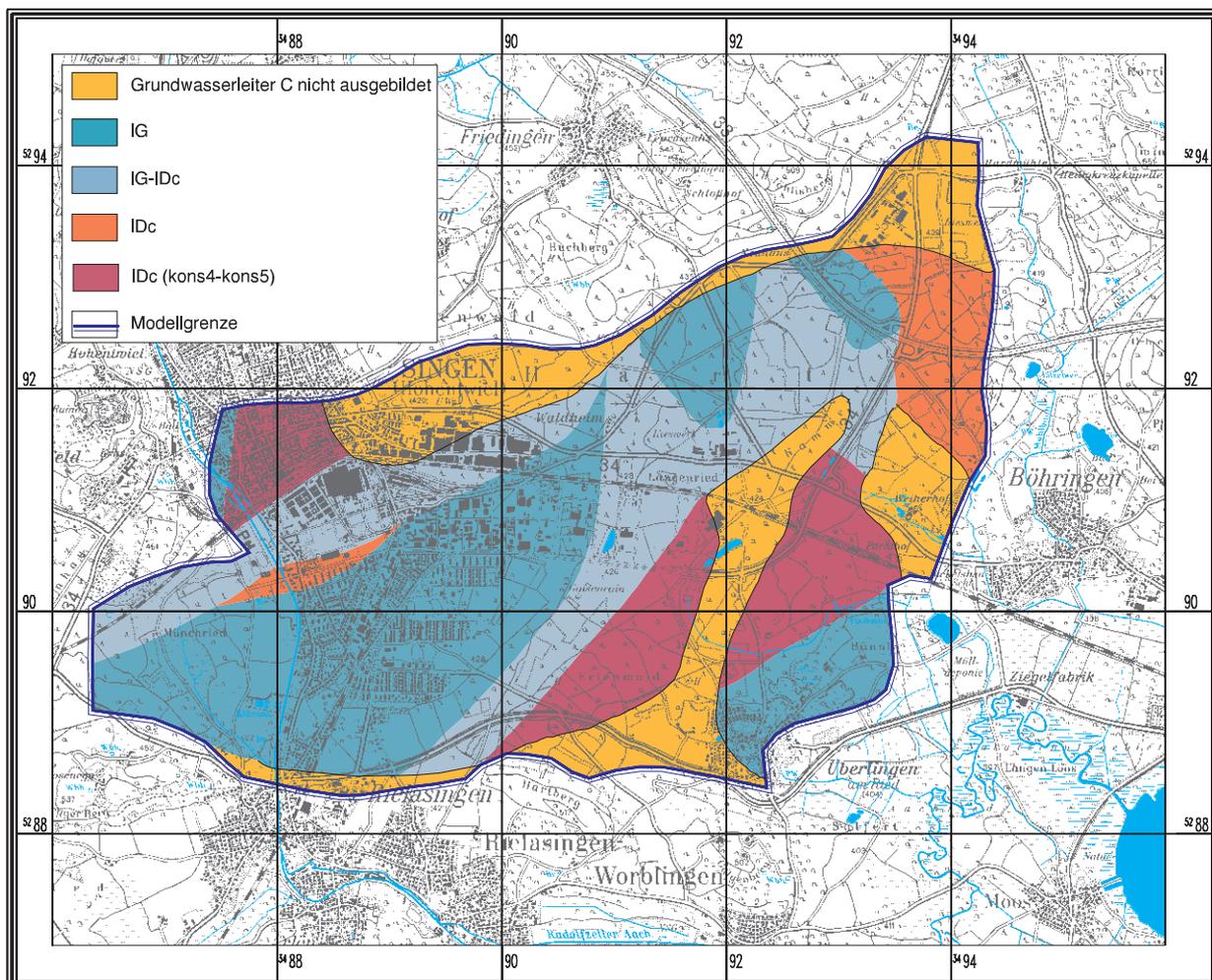


Abb. 47: Lithofazieseinheiten des Grundwasserleiters C im Singener Becken

Die Karte zeigt die Verbreitung der Lithofazieseinheiten im Grundwasserleiter C. Jeder Einheit kann ein repräsentativer k_f -Wert zugeordnet werden [$IG - 2,3 \cdot 10^{-3}$; $IG-IDc - 1,6 \cdot 10^{-3}$; $IDc - 1,3 \cdot 10^{-3}$; $IDc (kons4-kons5) - 1,2 \cdot 10^{-6}$]. Die Verbreitung des Grundwasserleiters C und die Verteilung der k_f -Werte werden aus dem GIS-Datensatz in das Modellnetz übertragen.

Die Modellergebnisse können auf verschiedene Arten dargestellt werden. Die geometrischen Ergebnisse der Modellierung (Grundwassergleichen, Bahnlinien und Isochronen in Grundrißprojektion) werden über eine Schnittstelle an ARC/INFO übergeben und im DKA dokumentiert. Zusammen mit den Geodaten des hydrogeologischen Konzeptmodells und Topographiedaten können Kartenausdrucke erzeugt werden. Eingangs- wie Ergebnisdaten der Modellierung können aber auch online mit ArcView visualisiert und analysiert werden. Daneben wird über eine ASCII-Schnittstelle eine Graphikumgebung unterstützt, die Crossplots, Ganglinien und andere Diagramme erzeugt. Weiterhin wurde am LGRB eine Schnittstelle zu einem 3 D-Visualisierungswerkzeug auf der Grundlage der Explorer-Software von Silicon Graphics entwickelt.

11.6 Ausblick

In den Bereichen GIS und Modelle haben sich seit Anfang der 90er Jahre verschiedene Entwicklungen vollzogen. Einerseits wurden in Geoinformationssystemen einige hydrologische und hydraulische Modelltechniken integriert, ohne jedoch die vielfältige Funktionalität der reinen Modellprogramme zu erreichen. Andererseits sind die Werkzeuge für das Pre- und Postprocessing der meisten Simulationsprogramme hinsichtlich der Verarbeitung von Geometriedaten immer leistungsfähiger geworden. Die Ergebnisse sind jedoch nur teilweise befriedigend. So beschränkt sich das Postprocessing von Geometrien häufig auf die Funktionalität von Graphikprogrammen.

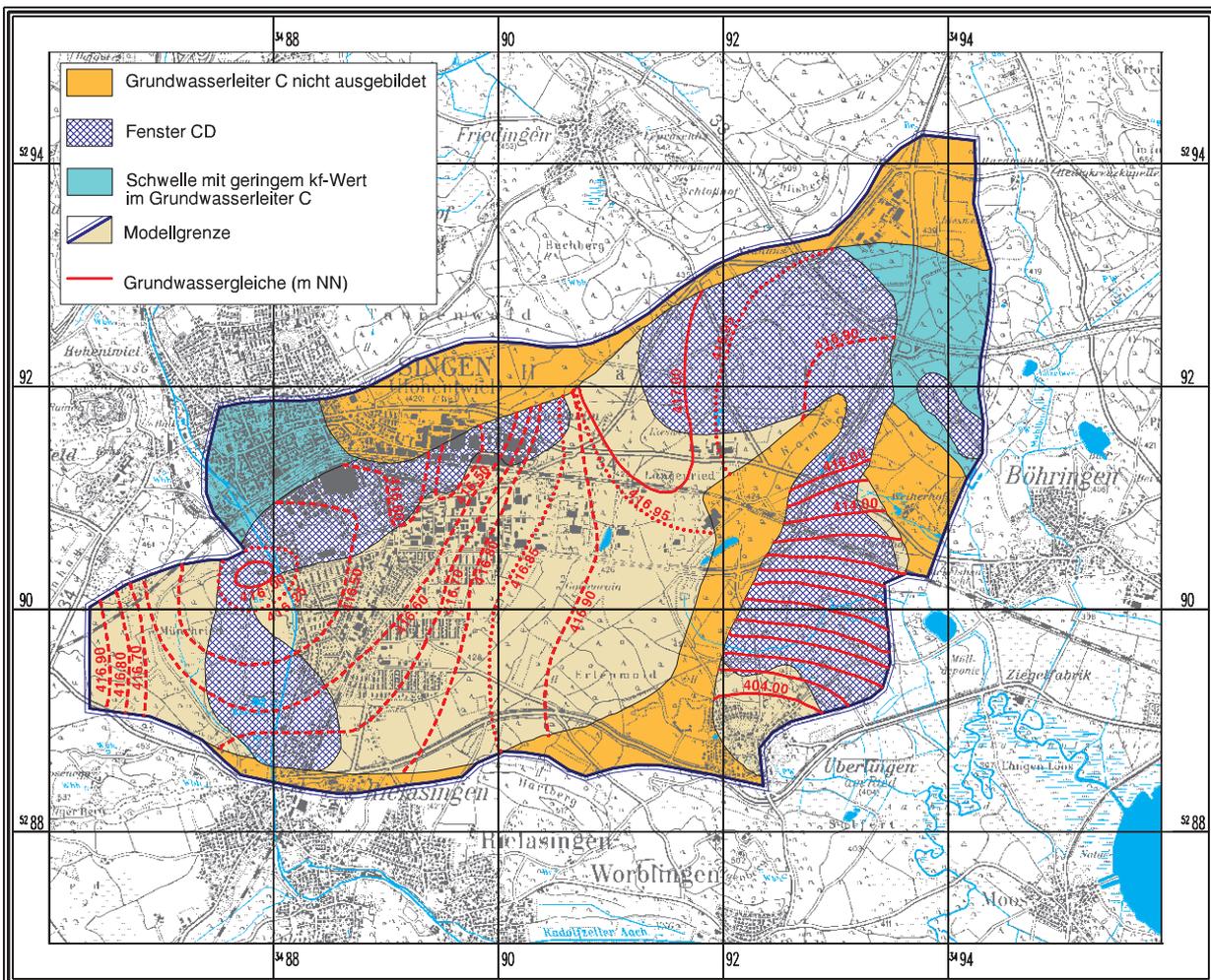


Abb. 48: Grundwassergleichen für das Grundwasserstockwerk CD im Singener Becken

Die Grundwasserleiter C und D sind in großen Teilbereichen ihrer Verbreitung über hydraulische Fenster miteinander verbunden. Dadurch stellt sich in beiden Grundwasserleitern das gleiche Potential ein, und man spricht vom Grundwasserstockwerk CD. Der Isolinenplan zeigt einen großen Absenktrichter im Westen des Modellgebiets.

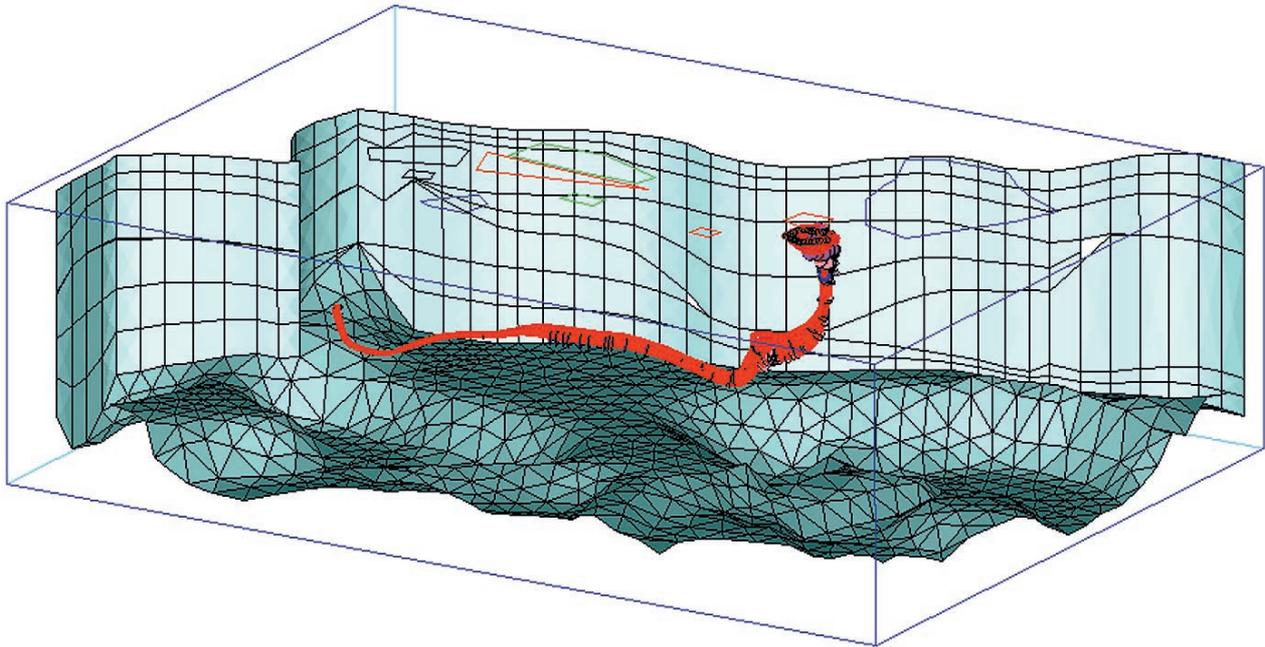


Abb. 49: Bildschirmdarstellung von gerechneten Bahnlinien im dreidimensionalen Strömungsfeld

Die Bahnlinien beschreiben den Grundwasserabstrom von einer Deponie bei einem berechneten Entnahmeszenario. Die Bahnlinien starten im oberen Grundwasserleiter E. Über ein hydraulisches Fenster kommt es zunächst zu einem vertikalen Abstrom in die tieferen Grundwasserleiter D und C. Im tiefsten Grundwasserleiter C erfolgt schließlich ein horizontaler Abstrom nach Westen in Richtung der Entnahmebrunnen. Die dreidimensionalen Bahnlinien wurden in FEFLOW errechnet und über die graphische Schnittstelle des Programms zusammen mit den Rändern des Modellnetzes dargestellt. Der Blick auf die dreidimensionale Darstellung erfolgt von oben aus südöstlicher Richtung.

Um die Stärken beider Technologien auszunutzen, ist es zweckmäßig, beide zusammen einzusetzen. Die Integration, Aufbereitung und Dokumentation von Geodaten ist eine klassische GIS-Aufgabe. Andererseits wird man bei der Beantwortung der vielfältigen geowissenschaftlichen Fragestellungen immer auf unterschiedliche Simulationstechniken und Rechenprogramme mit individuellen In- und Output-Formaten angewiesen sein. Bei einem zunehmend modularen Einsatz von Software rückt daher die Schnittstellenproblematik in den Vordergrund. Für die Übergabe von zweidimensionalen Geometrien existieren verschiedene GIS- und CAD-Standard-schnittstellen. Bei dreidimensionalen Geometrien haben sich bisher noch keine Standards etabliert. Derartige Anforderungen tauchen auf, wenn beispielsweise gerechnete Bahnlinien in einem dreidimensionalen Strömungsfeld (Abb. 49) oder berechnete Flächen gleicher Stoffkonzentration in einem dreidimensionalen Transportmodell vom Simulator an ein kommerzielles 3 D-Visualisierungsprogramm übergeben werden sollen, um sie dort mit dreidimensionalen Aquifergeometrien zu visualisieren.

Literatur

- CHIANG, W.-H., KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1997): ASM for Windows. An integrated system for modelling groundwater flow and transport. – 140 S., 1 CD-ROM; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- DIERSCH, H.-J. G. (1993): GIS-based groundwater flow and contaminant transport modelling – the simulation system FEFLOW. – In OSSING, F. [Hrsg.]: Praxis der Umweltinformatik, Bd. 4 (Rechnergestützte Ermittlung, Bewertung und Bearbeitung von Altlasten): 187–208; Marburg (Metropolis).
- NACHTNEBEL, H.-P., FURST, J. & HOLZMANN, H. (1993): Application of geographical information systems to support groundwater modelling. – In KOVAR, K. & NACHTNEBEL, H.-P. [Hrsg.]: HydroGIS 93: Application of geographic information systems in hydrology and water resources management, Proc. Vienna Conf., April 1993. – IAHS Publ., **211**: 653–664, 6 Abb.; Wallingford (IAHS Press).
- SEBHAT, M., HEINZER, T., GREER, W. & HANSEN, D. (1995): The development of an ARC/INFO GRID based interface to the USGS finite difference MODFLOW package. – Abstr. 15th ann. ESRI User Conf., May 1995, Palm Springs: 251 S.; Redlands, CA (ESRI).