

Langzeitsicherheits-
analysen für das End-
lager Konrad

Referenzfall

Grundwassermodell-
rechnungen mit dem
Programm NAMMU

Textband

Langzeitsicherheitsanalysen für
das Endlager Konrad

Referenzfall

Grundwassermodellrechnungen
mit dem Programm NAMMU

Textband



April 1993
Auftrags-Nr.: 65 300

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des TÜV Hannover im Rahmen der Begutachtung Konrad erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Inhalt

		Seite
1	Einleitung	1
2	Beschreibung des Hydrogeologischen Modells	2
2.1	Modellraum und sein hydrogeologischer Aufbau	3
2.2	Hydrogeologische Daten und Randbedingungen	4
3	Umsetzung des Hydrogeologischen Modells in ein Rechenmodell	5
3.1	Modellkonzept und Diskretisierung	5
3.2	Eingabedaten und Interpretation der Randbedingungen	7
4	Ergebnisse der Rechnungen mit NAMMU	8
4.1	Rechnungen zum "Referenzfall"	8
4.1.1	Grundwasserströmungsberechnungen	8
4.1.2	Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes im Rechenmodell	11
4.1.3	Trajektorienberechnungen	12
5	Diskussion der Ergebnisse	15
6	Literatur	16
7	Zitierte Unterlagen	17

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Standardprofil der Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes;
Quelle: NLfB
- Tab. 2: NAMMU-Eingabedatensatz des Referenzfalles
- Tab. 3: Bandbreiten und erster Rechenwert der Schichtdurchlässigkeits-
beiwerte; Quelle: NLfB
- Tab. 4: Bandbreiten und erster Rechenwert der Gebirgsporositäten;
Quelle: NLfB
- Tab. 5: Farben und Zeichenerklärung der Modellgitterschnitte
- Tab. 6: Durchfluß durch den Schnitt 3 im Aufstromgebiet des Endlagers
- Tab. 7: Startpunkte, durchlaufende Einheiten, Laufwege, Laufzeiten und End-
punkte der Partikel in den Trajektorienberechnungen zum "Referenzfall"

Verzeichnis der Bilder

- Bild 1.1: Untersuchungsgebiet des Endlagers Konrad; Quelle: NLFb
- Bild 1.2: NAMMU-Modellgebiet mit Lage der Modellschnitte
- Bild 2.1-2.22: 2D-Modellgitterschnitte nach West-Ost-Schnitten des NLFb
- Bild 3: 3D-NAMMU-Finite-Element-Gitter und Modellgitter Konrad
- Bild 4.1-4.6: Süd-Nord-Modellgitterschnitte
- Bild 5.1-5.12: Topographie des Modellgitternetzes der hydraulischen Einheiten
- Bild 6: Isopotentiallinien auf der Modelloberfläche; Grundwassergleichenplan
- Bild 7.1-7.16: "Referenzfall": Isopotentiallinien in West-Ost-Gitterschnitten
- Bild 8.1-8.16: "Referenzfall": Darcy-Geschwindigkeiten in West-Ost Gitterschnitten
- Bild 9.1-9.7: "Referenzfall": Isopotentiallinien in Süd-Nord-Gitterschnitten
- Bild 10.1-10.7: "Referenzfall": Darcy-Geschwindigkeiten in Süd-Nord Gitterschnitten
- Bild 11.1-11.3: Trajektorienberechnungen des "Referenzfalles", Seitenansicht und Aufsicht auf das 3D-Modell

1 Einleitung

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager KONRAD wurde die GRS vom TÜV Hannover beauftragt, im Zusammenhang mit der Begutachtung der vom Antragsteller vorgelegten Langzeitsicherheitsanalysen Grundwassermodellberechnungen durchzuführen. Basis dieser Berechnungen bildet die geologische und hydrogeologische Bewertung des Standortes durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) als dem geologischen Gutachter der Genehmigungsbehörde. Aus dieser Bewertung resultiert für die Langzeitsicherheitsanalysen die Entwicklung einer hydrogeologischen Modellvorstellung mit den hydrogeologischen Standortdaten (Gutachterliches Modell) durch das NLfB.

Die für eine Modellierung und Analyse der Langzeitsicherheit erforderlichen Daten zum gutachterlichen Modell sind in den NLfB-Unterlagen /NLfB 90/ dokumentiert. In diesen Unterlagen werden sowohl die Abgrenzung des Modellgebietes mit seinen Randbedingungen als auch der Schichtaufbau durch Standardprofile der Geologie und Hydrogeologie vorgegeben. Zusätzlich liegen Tiefenlinienpläne der einzelnen hydrogeologischen Einheiten vor. Neben den Mächtigkeiten und den Verbreitungen der Schichten enthalten die Unterlagen die Bandbreiten der effektiven Gebirgsporosität und der hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, eine Einschätzung der Verteilung der Daten innerhalb der Bandbreiten, sowie einen Vorschlag für den Referenzdatensatz.

Die GRS hat das gutachterliche Modell in ein numerisches Modell zur Berechnung durch den Code NAMMU /ATK 85a,b/ umgesetzt und die Berechnungen im Süßwassermodell, d.h. ohne Berücksichtigung der Salinität und deren Rückwirkung auf das Transportverhalten der Wässer durchgeführt. Auf dieser Basis wurden die Auswirkungen der Bandbreiten der Daten und deren Verteilung innerhalb der Bandbreiten auf die Grundwasserlaufzeiten und -laufwege in sogenannten Unsicherheitsanalysen ermittelt /GRS 93/ und der Referenzdatensatz statistisch abgesichert. Der Referenzdatensatz bildet die Grundlage für die Sicherheitsanalysen in der Nachbetriebsphase. Die in der numerischen Analyse der Grundwassersituation mit dem Süßwassermodell und dem Referenzdatensatz ermittelten Grundwassergeschwindigkeiten werden vom NLfB aus folgenden Gründen als konservativ eingeschätzt:

- Im Modellgebiet ist eine mit der Teufe zunehmende Salinität der Wässer festzustellen. Das flächenhafte Auftreten hochsaliner Tiefengrundwässer und das sich darbietende hydrochemische Erscheinungsbild des Tiefengrundwasserkörpers kann nicht das Ergebnis kurzzeitiger Vorgänge sein.
- Genese und Existenz der salinen Tiefenwässer sind im Grundsatz eng an zeitliche Entwicklungen gebunden und weisen auf sehr lange Zeiträume hin.
- Während für die Anreicherungsprozesse selbst schon erhebliche Zeiträume erforderlich sind, bewirken die sich ändernden physikalischen Eigenschaften der Tiefenwässer zusätzlich eine Verzögerung der Grundwasserbewegung.
- Die Ergebnisse der Altersbestimmung der Wässer weisen auf eine sehr lange Verweildauer und geringe Grundwasserbewegungen hin.
- Die im Süßwassermodell ermittelten Durchströmungsraten durch das Grubengebäude sind um ein Vielfaches größer als in der Realität zu erwarten.

Unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebene Ergebnisse und Interpretationen können für die Tiefenwässer Grundwassergeschwindigkeiten erwartet werden, die deutlich kleiner sind als die in den Süßwasserrechnungen des Referenzfalles ermittelten.

Somit ist die in diesem Bericht dokumentierte Langzeitsicherheitsanalyse auf der Basis des gutachterlichen Modells und des Referenzdatensatzes als konservative Vorgehensweise zur Ermittlung der Grundwasserlaufzeiten anzusehen. Die Auswertung der Laufwege und Laufzeiten erfolgt mit Hilfe von Particle-Tracking Verfahren. Wie schon in /GRS 90/ beschrieben, liegt eine durch die Particle-Tracking-Programme hervorgerufene Ungenauigkeit in der Bestimmung einzelner Stromröhren zu 1D-Transportwegen vor, die bei der Auswertung zu berücksichtigen ist. Die Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt im weiteren alle Erkenntnisse aus den vorherigen Rechnungen /GRS 90; GRS 91/ und legt die Transportwege für die nachfolgenden 1D-Nuklidtransportrechnungen fest. .

2 Beschreibung des Hydrogeologischen Modells

Grundlage des von der GRS für die Modellierung in NAMMU benutzten Modelleingabedatensatzes sind die NLfB-Unterlagen /NLfB 90/. In diesen Unterlagen werden sowohl die Abgrenzung des Modellgebietes mit seinen Randbedingungen als auch der Schichtaufbau durch Standardprofile der Geologie und Hydrogeologie vorgegeben. Zusätzlich wurden Tiefenlinienpläne der einzelnen hydrogeologischen Einheiten zur Verfügung gestellt. Neben den Mächtigkeiten und den Verbreitungen der Schichten enthalten die Unterlagen die Bandbreiten der effektiven Gebirgsporosität und der hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, sowie einen Vorschlag für den Referenzdatensatz als Modelldatensatz. Durch Vergleichsrechnungen in den Bandbreiten der Parameter wurde dieser Datensatz als Referenzdatensatz bestätigt und bildet somit die Grundlage der Langzeitsicherheitsanalysen.

2.1 Der Modellraum und sein hydrogeologischer Aufbau

Das Modellgebiet erstreckt sich in seiner Süd-Nord-Ausrichtung über ca. 45 km und in der West-Ost-Richtung über ca. 15 km (Bild 1.1). Es besitzt eine maximale Teufe von ca. 3 km. Der südliche Modellrand wird ungefähr durch den Verlauf des Salzgitter-Höhenzuges gebildet. Ausgehend von der muldenförmigen Struktur des sich nach Norden anschließenden Untersuchungsraumes und den von Süden nach Norden streichenden Salzstrukturen, die die Grenzen des westlichen und östlichen Randes darstellen, wird von einem im wesentlichen Süd-Nord gerichteten Grundwasserstrom ausgegangen. Den nördlichen Modellrand bildet die Aller-Niederung, wo der Einlagehorizont Oxford mit dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk in hydraulischer Verbindung steht. In der Vertikalen wird das Liegende des Oberen Muschelkalkes (Salinar des Mittleren Muschelkalks) als Modellbasis angenommen. Seine vollständige Verbreitung über die gesamte Modellbasis wird nicht vorausgesetzt. Jedoch wird unterstellt, daß das mögliche Fehlen des Salinars hydraulisch keine Wirkung auf das übrige Modellgebiet ausübt /NLfB 90/.

Im Modellraum wird entgegen den Modellvorstellungen des Antragstellers (12 Schichten) /EU 197/ in der NLfB-Vorgabe zwischen 19 hydrogeologischen Einheiten differenziert. Vor allem die zusätzlich in das Modell aufgenommenen Aquifere Wealden und Dogger- β -Sandstein stellen gegenüber den Antragsunterlagen mögliche neue

Ausbreitungspfade dar. Hierbei findet insbesondere der Wealden-Aquifer aufgrund seiner Anbindung an das Oxford und seines Ausstreichens in den Oberflächenaquifer (nordwestliches Modellgebiet) Beachtung. Eine weitere Neuerung gegenüber dem hydrogeologischen Modell des Antragstellers stellt die Anbindung des Oberen Keuper an den Oberflächenaquifer östlich des Salzstockes Thiede dar. Der Transgressionshorizont Einheit 8 wurde aufgrund neuer Erkenntnisse nicht modelliert /NLfB 90/. Die Lage, die Verbreitung und die Mächtigkeiten von 18 Einheiten sind in hydrogeologischen Schnitten bzw. hydrogeologischen Tiefenlinienplänen dargestellt.

In der Umgebung von Störungen und an den Salzstockrändern treten Zonen unterschiedlich starker Zerrüttung auf. In diesen bis zu 500 m beidseitig der Störungen verbreiteten Zonen sind die betroffenen hydrogeologischen Einheiten mit größeren Durchlässigkeitseiwerten und Porositäten behaftet.

2.2 Hydrogeologische Daten und Randbedingungen

Die Porosität- und Durchlässigkeitseiwerte für den Rechenlauf wurden vom NLfB vorgegeben (Tab. 3. u. 4). In den Zerrüttungszonen ist im Vergleich zum umgebenden Gebirge eine größere effektive Gebirgsporosität und -durchlässigkeit angenommen worden. Diese Erhöhung der hydraulischen Parameter wurde im Gegensatz zu den Daten des Antragstellers für den Referenzfall mit einem einheitlichen Faktor 10 für alle Störungssysteme belegt.

Die physikalischen Randbedingungen auf den Modellrändern wurden folgendermaßen definiert:

- zeitlich konstante Potentialverteilung an der Modelloberfläche über die Grundwassergleichen des oberen Aquifer bzw. im Wiederergänzungsgebiet der tieferen Aquifere am Salzgitter-Höhenzug über die topographische Geländehöhe
- vertikale Ränder des Modellgebietes sind als undurchlässig zu modellieren
- die Modellbasis ist hydraulisch geschlossen /NLfB 90/.

3 Umsetzung des Hydrogeologischen Modells in ein Rechenmodell

3.1 Modellkonzept und Diskretisierung

Bei der Umsetzung des hydrogeologischen NLFB-Modellansatzes des Standortes Konrad in ein numerisches Modell für das Programm NAMMU erfolgt als erstes die Übertragung der geologischen Struktur mit ihren Schichtgliedern in ein Maschennetz von Finite-Elementen. Dabei folgt die Berandung des Rechenmodells in NAMMU den Rändern des hydrogeologischen Modells (Bild 1.2).

Im vorliegenden Fall wurde die Maschennetzgenerierung anhand von 30 hydrogeologischen West-Ost-Schnitten durchgeführt, weil die Hauptkomplexität der regionalen Geologie in der vertikalen Sequenz verschiedener hydrogeologischer Einheiten besteht. Insgesamt wurden die 19 verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in 18 Modellschichtbelegungen überführt und mit Durchlässigkeitsbeiwerten und Porositätswerten belegt.

Die hydrogeologischen Einheiten Quartär und Tertiär bzw. Mittlerer und Unterer Keuper wurden aufgrund der äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten zu jeweils einer Einheit zusammengefaßt. Der Wealden wurde aufgrund der definierten Differenzierung zwischen Nord- und Südmodellgebiet durch zwei hydrogeologische Einheiten charakterisiert. Der Obere Keuper wurde nach NLFB-Vorgabe mit einer geringeren Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung anisotrop modelliert. Hierzu war es modelltechnisch notwendig, in den steil stehenden Schichten des Wiederergänzungsgebietes für die Einheit Oberer Keuper eine zusätzliche neunzehnte Einheit zu definieren. Zusätzlich wurde Zechsteinsalz als Einheit 20 aufgenommen.

Störungen wurden nach Vorgabe des NLFB nicht als engbegrenzte Diskontinuitäten betrachtet, sondern als mehr oder weniger breite Zonen erhöhter Auflockerung beidseitig der eigentlichen Störung abgebildet. In diesen ca. 500 m breiten Zonen beidseitig der Störungen und an den Salzstockrändern können die einzelnen hydrogeologischen Einheiten mit unterschiedlich hohen Durchlässigkeiten belegt werden. Da von einem konstanten Erhöhungsfaktor der hydrogeologischen Einheiten in den Störzonen ausgegangen wurde, wurden insgesamt 40 unterschiedliche Modellschichtbelegungen vorgenommen.

Zuerst wurden 2D-Gitternetze anhand der Vertikalschnitte generiert, wobei jedes Schichtglied, in diesem Fall jede hydrogeologische Einheit, vertikal mit einem Element beschrieben wurde (Bilder 2.1-2.22). Durch die Wahl von 2D-Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion erhält jedes Element einer Schicht 9 Stützpunkte (Knoten), für die die Ansatzfunktionen gelöst werden. Damit ist jede Schicht in der Vertikalen mit 3 Knoten hinreichend bestimmt.

Im 3D-Modell wurden prismatische Elemente zur Modellierung auskeilender Schichtglieder längs des zu erwartenden höchsten Grundwasserdurchflusses in der Süd-Nord-Anbindung der Schnitte benutzt. Durch dieses Vorgehen bei der Diskretisierung bleibt die Anzahl der vertikalen Elemente in einem West-Ost-Schnitt erhalten. Damit konnte in der Durchsatzfläche des zu erwartenden höchsten Grundwasserdurchflusses die Diskretisierungsintensität einer hydrogeologischen Einheit beim gleichzeitigen Wegfallen einer anderen erhöht werden. Zusätzlich wurden zur Gitterverfeinerung in Ost-West-Richtung vertikalstehende prismatische Elemente eingeführt.

Nach einer Überprüfung wurden die generierten 2D-Modellgitterschnitte zu einem 3D-Maschenetz zusammengefügt (Bild 3). Hierfür wurden zunächst die Netzfeldabschnitte zwischen den 2D-Modellgitterschnitten beschrieben, wobei im einzelnen zu identifizieren war, welche Blöcke der einzelnen Schnitte miteinander zu verbinden waren. Nach einer Überprüfung brauchten 8 der 30 West-Ost-Schnitte nicht benutzt werden, da weder die Lage noch die Mächtigkeit oder Sequenz der hydrogeologischen Einheiten wesentliche Veränderungen gegenüber benachbarten Schnitten aufwiesen. Auskeilende Schichtglieder wurden in Süd-Nord-Richtung durch prismatische, alle anderen durch quaderförmige Elemente modelliert.

Die Belegung der 3D-Elemente der Süd-Nord verlaufenden vertikalen Gitterebenschnitte wurde anhand der hydrogeologischen Süd-Nord-Schnitte überprüft. Sie zeigen das Modellgitternetz in der Verbindung der einzelnen West-Ost-Netzgitterschnitte (Bilder 4.1-4.6), wobei auftretende Fehlbelegungen in der Anbindung der 2D-Schnitte erkennbar werden und sich korrigieren lassen. Im weiteren wurden zur Überprüfung der abgebildeten Geologie Projektionen hydrogeologischer Einheiten auf die horizontale Ebene erzeugt und mit den geologischen Tiefenlinienplänen verglichen (Bilder 5.1-5.12). Auf diese Weise wurden Abweichungen des numerischen Modells vom hydrogeologischen in den Schichtbildern sowie verzerrte Elemente entdeckt und korrigiert.

Durch diese Vorgehensweise wurde das numerische Modell der hydrogeologischen Interpretation des Standortes Konrad angepaßt. Nach Abschluß der Diskretisierung besitzt das NAMMU-Rechenmodell nunmehr ca. 200 quadratische Oberflächenelemente bzw. das 3D-Modellgitter 628 prismatische Elemente (Dreieckprismen) mit 18 Stützpunkten und 2 024 quaderförmige Elemente mit 27 Stützpunkten. Insgesamt enthält das Modell 21 128 Stützstellen (Knoten).

3.2 Eingabedaten und Interpretation der Randbedingungen

Nach der Modellgenerierung wurde der Referenzfall definiert, dessen Datensatz mit den hydraulischen Kennwerten und Randbedingungen des NLfB-Datensatzes für den ersten Rechenlauf übereinstimmt und in der Tabelle 3 aufgelistet ist. Die die Muldenstruktur an der Modellbasis begrenzenden gering permeablen salinaren Schichten des Mittleren Muschelkalkes bzw. die die Mulde seitlich bis zur Modellbasis begrenzenden Salzdome und -mauern des Zechstein wurden i.a. nicht diskretisiert, sondern bilden als "no-flow boundaries" die Modellgrenzen, über die kein Wasseraustausch möglich ist. Als weitere vertikale "no-flow-boundaries" wurden die nördlichen /NLfB 91/ und südlichen Modellgrenzen angesetzt.

Die südliche Randbedingung wird begründet mit der Grundwasserscheide des tieferen Aquifersystems am Salzgitter-Höhenzug, d.h. dem Ausstreichen der tiefsten Aquifere an die Erdoberfläche. Am nördlichen Rand streichen Aquifere bis zur hydrogeologischen Einheit Cornbrash unter das Quartär aus. Durch diese Wahl der Randbedingungen wird das gesamte im Wiederergänzungsgebiet der tieferen Aquifere eindringende Grundwasser durch die Aquifere des Modellgebietes gezwungen und im Grundwasserabflußgebiet in den obersten Aquifer eingespeist. Damit findet der gesamte Wasseraustausch über die Modelloberfläche statt, die ihrerseits über den obersten Aquifer mit einer zeitlich konstanten Druckrandbedingung belegt wird. Diese Druckwasserrandbedingung gibt die Grundwassergleichenkarte des NLfB /NLfB 90/ bzw. in den Gebirgszügen die Topographie des Modellgebietes als freie Grundwasser Oberfläche wieder (Bild 6).

4 Ergebnisse der Rechnungen mit NAMMU

Das Ergebnis der im Kapitel 3 beschriebenen Erstellung eines NAMMU-Rechenmodellgitters ist ein dreidimensionales numerisches Modell des Endlagerstandortes Konrad. Hierbei zeigen die abgebildeten Modellgitterschnitte (Bilder 2.1-2.22), daß sich auch komplizierte hydrogeologische Systeme mit mehreren zum Teil auskeilenden und in der Schichtmächtigkeit stark schwankenden Aquiferen und Aquitarden mit den NAMMU-Prozeduren hinreichend genau abbilden lassen. Dabei ist insbesondere die flächentreue bzw. raumtreue Abbildung durch die angewendeten verschiedenen Finite-Elemente möglichst gut angenähert.

Dieses generierte 3D-Modell (Bild 3) dient als Grundlage der nachfolgenden Rechnungen zum Referenzfall des gutachterlichen Modells.

4.1 Rechnungen zum Referenzfall

4.1.1 Grundwasserströmungsberechnung

Der NLfB-Datensatz der Rechnungen zum Referenzfall wird durch die beiden Tabellen 3 und 4 dargestellt, wobei jeweils die Werte der 3. Spalte als Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Porositätswerte der Schichten benutzt wurden. Aus modelltechnischen Gründen wurde der Aquifer der Einheit Oberer Keuper im Wiederergänzungsgebiet als eigene hydrogeologische Einheit modelliert. Für die gestörten hydrogeologischen Einheiten in den Zerrüttungszonen wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte einheitlich mit dem Faktor 10 multipliziert.

Dieser Fall entspricht einer Modellvorstellung, wie sie der Antragsteller im BGR-Störzonenmodell berücksichtigt und im Modell für das Programm FEM301 verwirklicht hat /EU 210/. Im Gegensatz zu den Rechnungen des Antragstellers wurden zusätzliche hydrogeologische Einheiten in das Modell übernommen und die Durchlässigkeiten verschiedener Störzonen nicht differenziert, sondern erhielten mit dem Faktor 10 die gleiche Leitfähigkeitserhöhung.

Als Ergebnis der NAMMU-Referenzfallrechnung zeigen die Bilder 7.1-7.16 und 8.1-8.16 die Druckpotentialfelder und Darcy-Geschwindigkeitsfelder in West-Ost

Modellgitterschnitten für die Bereiche der Wiederergänzung, für den Endlagerbereich, für die Modellmitte sowie für die Bereiche des Grundwasserabstroms über die relevanten Aquifere aus dem Modell.

Die Pfeile in den Geschwindigkeitsplots stellen eine Projektion der Einheitsvektoren von Darcy-Geschwindigkeiten in den Elementzentren der Schnittebene dar. Richtung und Pfeillänge geben die Raumrichtung der Geschwindigkeit an, dabei wird der Winkel zur Flächennormalen umso kleiner, je kürzer die Pfeillänge ist. Gleichzeitig gibt die Farbe der Pfeile die Geschwindigkeitsbereiche wieder. Das heißt: Alle Pfeile dunkelblauer Farbe liegen im Bereich eines definierten Geschwindigkeitsintervalls, wobei innerhalb eines Intervalls die Größe der Pfeilspitze die Geschwindigkeitshöhe widerspiegelt. Die Farbänderung von dunkelblau über rot nach grün stellt eine Abstufung der Intervalle zu kleineren Geschwindigkeiten dar.

Im Bild 7.1 (Wiederergänzungsgebiet) zeigen die in der Schnittfläche steil zu den Aquiferen Oberer Muschelkalk, Oberer Keuper und Hilssandstein stehenden Isopotentiallinien den Grundwassereinstrom in die tieferen Aquifere über das Wiederergänzungsgebiet des Salzgitter-Höhenzuges auf. Die geschlossenen Potentiallinien deuten gleichzeitig den aufgrund des Salzstockes Flachstöckheim erzwungenen Grundwasserstrom nach Norden an. Weiterhin zeigen die senkrecht zur Schichtung verlaufenden Drucklinien des Oberen Keupers seine Anisotropie und damit den verminderten Austausch von Wässern zum Liegenden und Hangenden.

Die Bilder 7.2-7.4 und 8.2-8.4 zeigen die Druck- und Geschwindigkeitsfelder in Ost-West-Vertikalschnitten vor dem und durch das Endlager. Im Alb verlaufen die Isopotentiallinien engständig ungefähr parallel der horizontalen Schichtlagerung. Sie zeigen über diese gering permeable Schicht einen starken Potentialabbau zur Modelloberfläche. Der vertikale Bereich zwischen dem Hilssandstein und der Modellbasis weist ein schwaches Druckfeld auf. Bedeutend dabei ist, daß in der Endlagerformation Oxford im Bereich des Konradgrabens ein niedrigeres Potential vorliegt als im Hilssandstein darüber. Das Druckgefälle beträgt im Konradgraben am Beispiel des Schnittes $y=11\ 000$ (Bild 7.3) ca. 6 m zwischen Hilssandstein und Endlagerbereich im Oxford. Dies erzeugt in diesem Bereich einen aus dem Hilssandstein gerichteten Grundwasserstrom in die Nebengesteine der Unterkreide (Tone). Der unterste Aquifer (Oberer Muschelkalk) liegt in etwa auf gleichem Druckniveau wie der Oxford.

Somit entwässert der Hilssandstein vermehrt in das Liegende, wobei der Endlagerbereich mit Grundwasser aus dem Hangenden gespeist wird. Die Darcy-Geschwindigkeitsvektoren innerhalb der Aquitarden zeigen im Liegenden des Hilssandstein einen dem Potentialgefälle folgenden abwärts gerichteten Grundwasserstrom zu den Aquiferen, wobei eine Umkehrung im Westteil durchaus möglich ist. Sie deuten wieder die Infiltration des Hilssandsteins in die liegenden Tone der Unterkreide an, die wiederum in den Wealden und den Kimmeridge entwässern. Dies wiederum hat einen in diesem Bereich erhöhten abwärts gerichteten Grundwasserstrom aus dem Oxford in das Liegende zur Folge. Auch nach Ausbeiben des Hilssandstein nördlich des Endlagers (im Schnitt 11, $y = 15\ 250$, Bild 7.5) liegt ein flaches Druckgefälle über den Einheiten Oxford und Kimmeridge zu den liegenden Einheiten einschließlich des Oberen Keuper vor. Erst der Obere Muschelkalk besitzt ein vergleichbar hohes Potential wie das Oxford. Dies bewirkt einen vermehrten Abstrom von Grundwasser aus der Endlagerformation in die liegenden Einheiten.

Im Abstrom des Endlagers ist das Druckgefälle ab Schnitt 12 (Bild 7.6) zwischen der Endlagerformation und dem Liegenden sehr flach und steigt zum Oberen Keuper wieder auf das Druckniveau des Oxford an. Es deutet sich im zentralen Bereich ein Süd-Nord-Strom in den Einheiten Cornbrash und Dogger- β -Sandstein an (Bild 7.6). Hervorgerufen wird dieser S-N-Strom in den Einheiten durch die Infiltration von Wässern aus dem liegenden und hangenden Aquiferen, Oxford und Oberer Keuper. Zu erkennen ist dieser Grundwasserstrom an den steil zur Bildebene stehenden Geschwindigkeitsvektoren der Elemente des Cornbrash und Dogger- β -Sandsteins.

Im weiteren Abstrom des Endlagers ab Schnitt 15 (Bild 7.7 ff) entsteht ein Potentialgefüge mit einem generellen Gradienten zur Oberfläche, wobei die Grundwasserleiter Oxford, Cornbrash und Dogger- β -Sandstein, aus dem Liegenden mit Grundwasser gespeist werden und ihrerseits Grundwasser in das Hangende abgeben. Die Süd-Nord-gerichteten Darcy-Geschwindigkeiten in den Einheiten Cornbrash und Dogger- β -Sandstein liegen dem Betrag nach höher als die des Oxfords, mit der Ausnahme des Bereichs der Salzstockauflockerungszone. Im Ausstrich der für die Ausbreitung aus dem Endlager bedeutenden Aquifere zeigt der Grundwasserstrom die Anbindung des Wealden an den Oberflächen Aquifer. Ein Hauptwasserstrom verläuft in der Auflockerungszone des Salzstockes Broistedt-Wendeburg am nordwestlichen Modellrand (Bild 7.15, Schnitt $y = 42\ 265\ M$). Ein weiterer Hauptwasserstrom zum Ausstrich bei

Calberlah, dieser wird jedoch durch den Versatz der Schichten in der Rhüme-Störung behindert, was das Aufsteigen der Wässer erzwingt.

Der Hauptstrom des Grundwassers in den tieferen Aquiferen folgt dem regionalen hydraulischen Gradienten von Süd nach Nord. Deutlich wird dies in den Bildern 9.1-9.7 und 10.1-10.7, in denen die Potentialfelder und die aus den Potentialfeldern abgeleiteten Darcy-Geschwindigkeiten in Süd-Nord-Schnitten dargestellt sind. Dabei zeigt sich, daß die Darcy-Geschwindigkeiten im Oxford für den Südteil des Modellgebietes bis ca. Schnitt 15 unter den Geschwindigkeiten in Combrash und Dogger- β -Sandstein liegen. Im Nordteil des Modells gleichen sich die Darcy-Geschwindigkeiten durch die zusätzlich aus dem Liegenden aufsteigenden Wässer an.

4.1.2 Bilanzierung des Grundwasserdurchsatzes im Rechenmodell

Zur Plausibilitätsüberprüfung der Druck- und Darcy-Geschwindigkeiten wurde im Zuflussgebiet des Endlagers der Grundwasserdurchsatz aus den Rechenergebnissen abgeschätzt. Hierzu wurden im Schnitt 3 (Bild 2.3) die Durchsatzflächen (E-W-Richtung) aller dort ausgehaltenen hydrogeologischen Einheiten berechnet und mit den entsprechenden S-N (normal zur Fläche) gerichteten Darcy-Geschwindigkeitskomponenten multipliziert. Das Ergebnis wird in Tabelle 6a als S-N-Grundwasserfluß jeder hydrogeologischen Einheit dargestellt. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Grundwasserflüsse, die dem Modell über die im Süden ausstreichenden hydrogeologischen Einheiten Rhät oder Oberer Muschelkalk zutreten. Sie stellen die Grundwassermenge dar, die in den tieferen Aquiferen des hydrogeologischen Modells über das Wiederergänzungsgebiet im Süden (Salzgitter-Höhenzug) zuströmen. Die so abgeschätzten Grundwasserzuflüsse in das Liegende des Endlagers betragen 1,8 l/s für die Einheit Oberer Keuper und 3,8 l/s für die Einheit Oberer Muschelkalk. Dies entspricht einem Gesamtfluß von 5,6 l/s und damit einer entsprechenden Wiederergänzung über den Salzgitter-Höhenzug, was aus den örtlichen Gegebenheiten erwartet werden kann. Gleichzeitig wird im Hilsandstein des gleichen Schnittes mit 22,8 l/s das 4fache an Wasser umgesetzt. Dies hebt die Bedeutung des Hilsandsteins als Wasserbringer im Hangenden des Endlagers hervor.

Im weiteren wurde für das Endlager eine Bilanzierung der Zuflüsse in das Endlager und Abflüsse aus dem Endlager durchgeführt. Hierbei sind insbesondere die Zuflüsse

in das Endlager von Bedeutung, da sie mit Ergebnissen anderer Rechenmodelle verglichen werden können. Gleichzeitig werden die Abflüsse zur Berechnung der Nuklidfreisetzung für nachfolgende Radionuklidtransportrechnungen benötigt. Das Endlager wird im NAMMU-Modell durch mehrere Finite-Elemente charakterisiert. Die Bilanzierung wurde für die Elemente durchgeführt, indem die Flächeninhalte der Elementseiten berechnet und mit den Darcy-Geschwindigkeiten normal zu diesen Seiten multipliziert wurden. Bei der Abschätzung der Zuflüsse in das Endlager ist die Gesamtfläche der hier betrachteten Elemente größer als die Eintrittsoberfläche des eigentlichen Endlagers. Dies liegt an der größeren Dimensionierung der das Endlager charakterisierenden Finite-Elemente gegenüber dem Endlager selbst. Damit wird jedoch der Einstrom in das Modellendlager überschätzt. Das Ergebnis der Bilanzierung ist ein Gesamtzustrom in das Endlager von $1810 \text{ m}^3/\text{a}$, wobei der größte Grundwasserzufluß mit 1393 m^3 über eine $5,1 \text{ km}^2$ große Fläche aus dem Hangenden des Oxford im Konradgraben zutritt. Dies steht im Einklang mit den schon beschriebenen vertikalen Darcy-Geschwindigkeitskomponenten im Hangenden des Endlagers und der Einspeisung aus dem Hilssandstein. Der Zustrom von Westen in das Endlager ist mit $310 \text{ m}^3/\text{a}$ etwas größer als der Grundwasserzufluß aus dem Süden ($Q = 267 \text{ m}^3/\text{a}$). Der außerhalb des Konradgrabens befindliche südliche Teil des Endlagers ist mit ca. 40 m^3 Grundwasserzufluß für die Bilanz von untergeordneter Bedeutung. Der hier abgeschätzte Wert des Zuflusses in das Endlager steht im Einklang mit berechneten Werten des Antragstellers. Der Gesamtabstrom aus dem Endlager wurde konservativ mit 2030 m^3 bilanziert. Der größte Abstrom erfolgt über die Endlagerbasis mit $1447 \text{ m}^3/\text{a}$. Der Bilanzierungsfehler zwischen abgeschätzten Ein- und Ausstrom liegt bei ca. 10 %, was für FE-Lösungsverfahren zu erwarten ist.

4.1.3 Trajektorienberechnungen

Die Berechnung der Grundwasserlaufzeiten und Laufwege wurden in NAMMU mittels Trajektorienberechnungen durchgeführt. Dabei werden in NAMMU über die Druckverteilung im Modell und die definierten effektiven Porositäten der hydrogeologischen Einheiten mit Hilfe von Particle-Tracking-Verfahren Stromlinien berechnet, die Fließwege nicht retardierender Tracer im Strömungsfeld darstellen. Die Ergebnisse der Trajektorienberechnungen sind je nach Startpunkt im Endlager verschiedene Stromlinien. Die im Referenzfall für die verschiedenen Endlagerteile in und außerhalb des Konradgrabens angesetzten Partikelstartpunkte sind repräsentativ. Dies wurde durch

eine Partikelwolke von mehr als 140 Startpunkten in Vergleichsrechnungen /GRS 93/ gezeigt.

Für die im nordöstlichen Bereich des Endlagers gestarteten Partikel (P12-P15, Tab.7) ist innerhalb des Konradgrabens ein Abtauchen über die Jura-Tone in den Cornbrash bzw. direkt in den Dogger- β -Sandstein zu erkennen. In der Modellmitte treten die direkt in den Dogger- β -Sandstein abgetauchten Partikel über die hangenden Tone in den Cornbrash ein, laufen schichtparallel um dann über die Einheiten Oxford, Kimmeridge, Wealden die Modelloberfläche im Bereich der Anbindung Wealden - Quartär im Nordosten zu erreichen (Bild 11.1). Die berechneten Partikel-Laufzeiten liegen zwischen 331,970 und mehreren Millionen Jahren (Tab.7).

Dabei durchlaufen die schnellsten Partikel P11, P12 ca. 70% ihrer Gesamtstrecke in den Dogger- β -Sandsteinen. Das Partikel P13 nimmt einen Weg über den Cornbrash (47% der Gesamtstrecke), ohne in den Dogger- β -Sandstein abzutauchen. Nach ca. 3 km Laufstrecke verläßt es den Cornbrash, durchläuft vertikal die Einheiten Oxford, Kimmeridge, Wealden, Unterkreide (einschließlich Alb) und erreicht die Modelloberfläche. Einen ähnlichen Weg nimmt das Partikel P15, wobei es 80% der Gesamtstrecke im Cornbrash und Dogger- β -Sandstein läuft. Beide Partikellaufzeiten sind aufgrund des Durchlaufens der Unterkreide mit 30 bzw. 2,2 Millionen Jahren entsprechend lang. Der Trajektorienverlauf des Partikels P14 ähnelt dem der Partikel P11, P12, jedoch liegen die Steckenanteile an der Gesamtstrecke bei 17% im Cornbrash, 26% im Dogger- β -Sandstein und mit 46% im mit einer kleineren Abstandsgeschwindigkeit behafteten Wealden. Die Gesamtlaufzeit beträgt 498.030 Jahre.

Drei der im südlichen Endlagerbereich außerhalb des Konradgrabens gestarteten Partikel (P8-P10) treten innerhalb des Oxford in den Konradgraben- Störzonenbereich ein, tauchen senkrecht über die Jura-Tone und den Cornbrash in den Dogger- β -Sandstein ab und verlassen in ihm den Störzonenbereich (Bild 11.2). Dann nehmen sie einen annähernd gleichen Verlauf und erreichen im Nordosten die Modelloberfläche. Die Laufzeiten liegen zwischen 455.220 und 946.970 Jahren (Tab. 7). Ein Partikel aus dem südlichen Teils des Endlagers nimmt einen direkt aufsteigenden Weg über das Deckgebirge. Dabei durchläuft dieses im Südteil des Endlagers gestartete Partikel (P7) noch vor dem Eintreten in den Konradgraben die Einheiten Oxford, Jura-Tone und Unterkreide (einschließlich Alb) senkrecht von unten nach oben. Es erreicht

direkt über dem Endlager die Modelloberfläche nach einer durch die Unterkreide geprägten Laufzeit von 12.282.590 Jahren.

Die Trajektorien der im nordwestlichen Endlagerbereich gestarteten Partikel zeigen ähnliche Wege (Bild 11.3) wie die im nordöstlichen Endlagerteil gestarteten. Jedoch treten die Partikel in der Modellmitte über Oxford und Kimmeridge in das Wealden ein und folgen im Wealden dem schichtparallelen Grundwasserstrom entlang des nordwestlichen Modellrandes. Mit einem unterschiedlich langen Verlauf im Wealden gelangen die Partikel im Nordwesten an die Erdoberfläche. Die Laufzeiten der Partikel liegen je nach Verbleib in einer hydrogeologischen Einheit, deren Anteil an der Gesamtstrecke und der Laufzeit für das Durchlaufen der Tone des Jura zwischen 344.940 (Partikel P4) und 1.300.000 (Partikel P5) Jahren (Tab. 7).

Bei allen Partikeln, die die Einheiten Oxford, Combrash und Dogger- β -Sandstein durchlaufen, liegen die durchlaufenen Wegstrecken für die liegenden Aquifere Combrash und Dogger- β -Sandstein und für die Endlagerformation Oxford einschließlich Wealden in der gleichen Größenordnung, wobei die Abstandsgeschwindigkeiten im Combrash und Dogger- β -Sandstein gegenüber dem ungestörten Bereich im Oxford und Wealden um den Faktor 4 höher liegen. Damit verbunden ist eine um den gleichen Faktor kürzere Laufzeit. Den weitaus höchsten Anteil an der Gesamtlaufzeit tragen die vertikal durchlaufenden Tone des Dogger bei.

5 Diskussion der Ergebnisse

Den Rechnungen der GRS zum Referenzfall lag der hydrogeologische Datensatz des NLFB zugrunde /NLFB 90/. Primäres Ergebnis dieser Rechnungen sind die Druckfelder im Modellraum, woraus die Geschwindigkeitsfelder ermittelt werden. Die Ermittlung der Partikellaufwege und -laufzeiten mittels Particle-Tracking-Verfahren unterliegen Einschränkungen, die in /GRS 90/ dargestellt sind. Die ermittelten Laufwege stellen Stromlinien dar und erfassen nicht den dispersiven bzw. diffusiven Transport einer Nuklidwolke. Für den Referenzfall wurde ein Maximum an Partikellaufwegen vom Endlager über die Einheiten Combrash, Dogger- β -Sandstein, Oxford, Kimmeridge und Wealden zur Modelloberfläche ermittelt. Aufgrund der relativ hohen schichtparallelen Abstandsgeschwindigkeiten bildet er einen Transportweg, der von Particle-Tracking-Rechnungen des Antragstellers abweicht. Im Oxford werden Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 0,01 m/a und 0,1 m/a errechnet; im Combrash und Dogger- β -Sandstein zwischen 0,4 - 0,1 m/a. Daraus lassen sich Partikellaufzeiten abschätzen, die sich nicht wesentlich von denen des Antragstellers ermittelten 300 000 Jahre /EU 76.1/ unterscheiden. Gleichzeitig stellt der Ausbreitungsweg über Oxford, Kimmeridge und Wealden bei ähnlichen hohen Laufzeiten mit ca. 30 km Laufweg gegenüber den 33 km in den Antragstellerrechnungen /EU 76.1/ einen kürzeren Laufweg dar. Dieser Ausbreitungsweg ist bei nachfolgenden Radionuklidtransportrechnungen berücksichtigt worden.

6 Literatur

- /ATK 85a,b/ Atkinson, R.; A.W. Herbert; C.P. Jackson; P.C. Robinson
NAMMU User Guide
AERE-R. 11364, 11365, May 1985
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit
Baltes, B., Bogorinski, P., Larue, J.:
Zwischenbericht zur Begutachtung des Endlagers für radioaktive
Abfälle
Schachtanlage Konrad Salzgitter
GRS-A-1730 (November 1990)
- /GRS 91/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit
Baltes, B., Bogorinski, P., Larue, J.:
Langzeitsicherheitsanalysen für das Endlager Konrad
Grundwassermodellrechnungen mit dem Programm NAMMU
Basisfall
GRS-A-1858 (Dezember 1991)
- /GRS 93/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit
Baltes, B., Bogorinski, P., Larue, J.:
Grundwasser-Transportrechnungen am hydrogeologischen Modell
Konrad zur Bewertung der Modelldaten und ihrer Bandbreiten
GRS-A-Bericht (in Vorbereitung)
- /NLfB 90/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Eingabedaten für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit
Geänderter Datensatz des Berichts
Archivnummer 107 447, 5.10.1990
- /NLfB 91/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Der Nordrand des Modellgebietes Konrad und Abschätzung
der Verdünnung
Archivnummer 108 091, 25.1.1991

7 **Unterlagen**

- /EU 76.1/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad:
Radionuklidausbreitung in der Nachbetriebsphase
TA 2242.03,9K/21285/ /-/ /-/ /ED/ /Rev. 0
- /EU 197/ Grundlagen der Modellrechnung für ein alternatives
hydrogeologisches Modell zur Langzeitsicherheit
BGR-Archivnr. 103265, August 1988
- /EU 210/ Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit dem
Programm FEM301 für ein alternatives geologisch-
hydrogeologisches Modell
Motor Columbus, November 1988

Verteiler

TÜV-Hannover

6 x

GRS

Geschäftsführer

Bereichsleiter

Projektbetreuung

Abteilung 604

Autoren

je 1 x

je 1 x

je 1 x

1 x

je 4 x

Gesamtauflage: 27 x