

**Untersuchungen zur  
sicherheitstechnischen Auslegung  
eines generischen Endlagers im Tonstein  
in Deutschland**

**- GENESIS -**

**Abschlussbericht**

Projektleiter: M. Jobmann

Zusammengestellt von: L. Uhlig

Bearbeiter:  
P. Amelung  
D. Billaux  
M. Polster  
H. Schmidt  
L. Uhlig

Dieser Bericht beinhaltet 2 Bände:

- Hauptband: GENESIS - Abschlussbericht
- Anlagenband: GENESIS - Geologie der Referenzregionen im Tonstein

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), vertreten durch den Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung im Forschungszentrum Karlsruhe, durchgeführt (FKZ 02 E 9733). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH oder ihrer Auftraggeber ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

## Inhaltsverzeichnis

### Zusammenfassung Executive summary

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modellregionen in Deutschland</b> .....	<b>5</b>
3.1	Festlegung der Modellregionen .....	5
3.2	Thermische Umgebungsbedingungen.....	7
3.3	Beschreibung der Schichtenfolge an den Modellstandorten .....	7
3.4	Modellgebiete und ihre geologische Situation .....	12
3.4.1	Modell Nord-1, Unterkreide-Tone .....	12
3.4.2	Modelle Süd-1, Süd-2 und Nord-2, Jura-Tone .....	14
3.5	Mineralogie der Wirtsgesteine .....	17
<b>4</b>	<b>Betrachtete Einlagerungsvarianten</b> .....	<b>19</b>
4.1	Bohrlochlagerung .....	19
4.2	Streckenlagerung .....	22
<b>5</b>	<b>Thermische Auslegungsberechnungen</b> .....	<b>24</b>
5.1	Einleitung und Grundlagen .....	24
5.2	Bohrlochlagerung .....	27
5.2.1	Bohrlochlagerung – Modell Nord-1 .....	27
5.2.2	Berechnungsergebnisse der Bohrlochlagerung (4 Modellgebiete).....	30
5.3	Streckenlagerung .....	32
5.3.1	Streckenlagerung – Modell Nord-1 .....	33
5.3.2	Berechnungsergebnisse der Streckenlagerung (4 Modellgebiete).....	35
5.4	Vergleich von Bohrloch- und Streckenlagerung .....	36
<b>6</b>	<b>Stabilitätsanalyse der Einlagerungsstrecken</b> .....	<b>37</b>
6.1	Betrachtete Modellgebiete und Materialparameter.....	37
6.2	Stabilitätsanalyse der Strecken bei Bohrlochlagerung .....	39
6.2.1	Die Auffahrung der Strecken .....	41
6.2.2	Rheologisches Verhalten von Tonstein .....	47
6.2.3	Der Einfluss des Wärmeeintrags durch die Behälter .....	50
6.3	Stabilitätsanalyse der Strecken bei Streckenlagerung .....	52
6.3.1	Die Auffahrung der Strecken .....	53
6.3.2	Der Einfluss des Wärmeeintrags durch die Behälter .....	54
6.3.3	Berechnungen mit verminderten Festigkeiten .....	58
6.4	Ergänzende Betrachtungen zum Konvergenzverhalten von Strecken im Opalinuston .....	58
<b>7</b>	<b>Weitere Betrachtungen zu den generischen Modellen</b> .....	<b>60</b>
7.1	Hebungsberechnungen .....	60
7.2	Temperaturerhöhung von Grundwasserleitern .....	62
7.3	Grubengebäudeplanung.....	65
<b>8</b>	<b>Vergleichende Bewertung der Modellregionen</b> .....	<b>69</b>
8.1	Bewertung aus Sicht der geologische Situation .....	69
8.2	Bewertung aus Sicht der thermischen Auslegung.....	69
8.3	Bewertung aus Sicht der Stabilitätsanalyse .....	70
8.4	Abschließende Bewertung der Modellgebiete .....	71
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>73</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>78</b>

---

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>79</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>81</b>

## **Danksagung**

Für ihre tatkräftige Unterstützung möchten wir den Berliner Kollegen der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), allen voran Herrn Dr. Peer Hoth, ganz herzlich danken. Die fachlichen Diskussionen und vor allem die Zusammenstellung und zielgerichtete Aufbereitung aussagekräftiger geologischer Informationen zu den ausgewählten Untersuchungsgebieten bildeten eine solide Grundlage für die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen. Weiterhin möchten wir uns bei Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Lux und seinen Mitarbeitern Oliver Czaikowski und Dr. Plamen Roussev für den Erfahrungsaustausch hinsichtlich der Anwendung rheologischer Stoffgesetze mit Schädigungsansatz in FEM-Berechnungen bedanken.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht setzt sich mit der möglichen Endlagerung von hochradioaktivem Abfall in Tonformationen auseinander. In Zusammenarbeit mit der BGR-Berlin wurden vier mögliche Referenzmodellgebiete (2 in Norddeutschland und 2 in Süddeutschland) im Tonstein sowohl auf Basis der AkEnd-Richtlinien als auch auf Basis weiterer Abwägungskriterien entwickelt, die sich aus der geologischen Situation, insbesondere der Lithologie und der Mineralogie, ableiten ließen (siehe Anlagenband - Geologie der Referenzregionen im Tonstein). Zum Zeitpunkt des Projektbeginns zeigte sich, dass international und national wenig Erfahrungen bezüglich des thermo-mechanisch-hydraulischen Verhaltens von Tonstein bei der Einlagerung von wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfällen vorhanden sind. Im Verlaufe dieses Projektes wurde auch durch weitere europäische FuE-Vorhaben zur Endlagerung im Tonstein das Wissen um dessen Eignung als Endlagerwirtsgestein erweitert.

Im Zuge dieses Projektes wurden zwei verschiedene Konzepte der Einlagerung – Bohrlochlagerung und Streckenlagerung – für verglaste, hochradioaktive Abfälle bzw. ausgediente Brennelemente betrachtet. Für beide Einlagerungskonzepte wurden thermische Auslegungsberechnungen durchgeführt. Anhand der vier verschiedenen Modellgebiete wurden notwendige Zwischenlagerzeiten, Behälterabstände und Bohrloch- bzw. Streckenabstände bestimmt. Aus den ermittelten Werten wurde ein minimaler Flächenbedarf abgeschätzt. Im Vergleich beider Einlagerungskonzepte zeigen sich sowohl Vorteile der Streckenlagerung (geringe notwendige Zwischenlagerzeit gegenüber der Bohrlochlagerung) als auch Vorteile der Bohrlochlagerung (geringer Flächenbedarf gegenüber der Streckenlagerung). Im Vergleich der vier Modellgebiete untereinander weisen die Modellgebiete in geringer Teufe (Nord-1, Süd-2) bei thermischer Betrachtung eindeutige Vorteile gegenüber den tiefer gelegenen Modellgebieten (Süd-1, Nord-2) auf. Der Flächenbedarf des Modellgebiets Nord-1 mit der geringsten Teufe beträgt bei Anwendung der Bohrlochlagerung ca. 2,3 km<sup>2</sup> und im Falle der Anwendung der Streckenlagerung zwischen 3,8 und 4,5 km<sup>2</sup>. Die Flächenangaben geben einen Hinweis auf die Größe des notwendigen „Homogenbereichs“ einer Tonformation in Deutschland.

Für ein tief gelegenes Modellgebiet und ein Modellgebiet in geringer Teufe (Süd-1 und Nord-1) wurden vergleichende Stabilitätsanalysen zu den Strecken beider Einlagerungskonzepte durchgeführt. Dabei wurde für das Konzept Bohrlochlagerung eine bergmännische Auffahrung und ein 30 cm Betonschalenausbau gewählt. Für das Konzept Streckenlagerung wurde eine Auffahrung mittels Tunnelbohrmaschine und Fertigbetonelemente als Ausbau gewählt. Unter Verwendung numerischer Berechnungsergebnisse wurden im Einzelnen Auflockerungszone, Druckspannung bzw. Biegemomentverteilung im Ausbau der gewählten Modellgebiete verglichen. Die elastoplastischen Berechnungen weisen für das Modellgebiet Süd-1 nach der Streckenauffahrung stets eine Überbelastung des Streckenausbaus aus, während im Ausbau des Modellgebietes Nord-1 keine Überbelastung aufgrund von Druckspannungen ermittelt wurde. Der thermische Einfluss der einzulagernden Behälter wurde in allen Berechnungen berücksichtigt. Der Wärmeeintrag der Behälter bewirkt eine Ausdehnung des Gebirges und damit zusätzliche Lasten für den Ausbau. Dadurch kommt es teilweise auch im Modellgebiet Nord-1 zu einer Überschreitung der zulässigen Druckspannungen im betrachteten Ausbau. Es wird am Beispiel verdeutlicht, welchen Einfluss der Wärmeeintrag der Behälter auf Streckenausbauten hat. Dieser thermische Einfluss sollte in Langzeitsicherheitsnachweisen beachtet werden. Die thermisch induzierten Belastungen im Streckenausbau bei Streckenlagerung sind konzeptbedingt größer als bei Bohrlochlagerung, da sich bei Streckenlagerung der wärmeentwickelnde Behälter innerhalb des Ausbaus befindet, wohingegen sich die Behälter bei der Bohrlochlagerung unterhalb der Strecke und in größerer Entfernung dazu befinden.

Neben den elastoplastischen Betrachtungen wurden in den Berechnungen zur Streckenstabilität bei der Bohrlochlagerung auch zeitabhängige Verformungen (Kriechen) einbezogen.

Hierbei zeigte sich, dass den Kriechprozessen große Bedeutung gegeben werden muss, da diese mit einer zusätzlichen Belastung für den Ausbau verbunden sind. So wurde beispielsweise im Rahmen von Berechnungen eine Verdopplung der Druckspannungen im Ausbau nach wenigen Jahren ausgewiesen. Unter Einbeziehung der zeitabhängigen Verformungen kommt es nach wenigen Jahren in allen Modellgebieten zu einer Überbeanspruchung der Streckenausbauten. Im Ergebnis zeigte sich, dass im Modellgebiet Nord-1 (-335 m) wesentlich *günstigere* geomechanische Randbedingungen herrschen als im Modellgebiet Süd-1 (-790 m) und damit an dieser Stelle *günstigere* Bedingungen für Streckenausbauten gegeben sind.

Durchgeführte Hebungsberechnungen zeigen, dass die Hebungen an der Tagesoberfläche in allen Gebieten sehr gering sind und somit bei möglichen Standortentscheidungen keine Berücksichtigung finden müssen. Die Abschätzungen zur Erwärmung von Grundwasserleitern zeigen Vorteile für das Modellgebiet Nord-1 gegenüber dem Modellgebiet Süd-1. Die Grundwasserleiter im Modellgebiet Nord-1 befinden sich in größerer Entfernung zum gewählten Endlager als die Grundwasserleiter im Modellgebiet Süd-1.

In den Grubengebäudeplanungen wurden Grundlagen für Streckensysteme des Endlagers entworfen. Als Bedingung ist hier vor allem die Trennung von Kontroll- und Überwachungsbereich zu nennen, die sowohl auf die Wetterführung als auch auf die Betriebsabläufe Einfluss hat.

In der Zusammenfassung der hier durchgeführten Untersuchungen werden die weniger tief gelegenen Modellgebiete Nord-1 und Süd-2 hinsichtlich der thermischen und geomechanischen Randbedingungen im Vergleich mit den tiefer gelegenen Modellgebieten Süd-1 und Nord-2 als  *eher günstig* eingestuft. Bei Beachtung sowohl der räumlichen Begrenzung des Modellgebiets Süd-2 als auch der sonstigen Abwägungskriterien wird insgesamt das Modellgebiet Nord-1 unter den vier betrachteten Modellgebieten favorisiert.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Datengrundlage für Tonsteine, die als potentielle Endlagerwirtsgesteine dienen könnten, in Deutschland gering ist. Für eine bessere Entscheidungsfindung hinsichtlich der Endlagerung sind standortbezogene Daten notwendig.

Im Ergebnis dieses Vorhabens ergibt sich weiterer Klärungsbedarf hinsichtlich der Endlagerung im Tonstein, sowohl aus konzeptioneller als auch materialspezifischer Sicht. Die im Vorhaben entwickelten Einlagerungskonzepte, die eine Einlagerung von stark wärmeentwickelnden Abfällen mit brauchbaren Zwischenlagerzeiten ermöglichen, müssen ihre Praxis-tauglichkeit im Rahmen von in-situ Versuchen noch beweisen. Weitere Fragestellungen ergeben sich aus der Verwendung der geotechnischen Barriere Bentonit, welche gegebenenfalls graphitisiert werden muss. Erfahrungen über den Einsatz von Graphit in Tonmaterialien zur Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit bestehen derzeit kaum. Hier stellt sich zudem die Frage der Notwendigkeit des Einsatzes von Bentonit, welcher vielleicht auch durch gemahlenes Haufwerk, also standorteigenem Material ersetzt werden könnte. Des weiteren muss die gewählte geotechnische Barriere ihre Funktion unter realitätsbezogenem Wärmeeinfluss und bergbaulichen Bedingungen beweisen. Auch die Frage der gegenseitigen thermomechanischen Beeinflussung befüllter und/oder unbefüllter Einlagerungsbohrlöcher im Hinblick auf Offenhaltungszeiten und Druckbelastung der Behälter ist noch ungeklärt.

Der vorliegende Bericht zeigt zudem auf, dass das Materialverhalten, insbesondere das rheologische Verhalten, von Tonstein unzureichend erforscht ist. Die durchgeführten Berechnungen verdeutlichen, dass sowohl zur Bewertung und Prognose der operativen Sicherheit als auch für die Wirkungsweise des Einschlusses von radioaktivem Abfall in Tonsteinen das rheologische Materialverhalten, nicht zuletzt unter thermischen Einflüssen, von entscheidender Bedeutung ist. Die Praxis zeigt hier, dass Erfahrungen zu Tonstein weniger allgemein und mehr standortspezifisch gesammelt werden sollten.

## EXECUTIVE SUMMARY

This project investigates the possibility of final disposal of high-level radioactive waste in clay formations. In co-operation with the BGR (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) in Berlin, four argillaceous formations (two in Northern Germany, two in Southern Germany) were selected as reference models based on the directives issued by AkEnd (Workgroup for the Selection of Repository Sites) as well as on other criteria deduced from the geological conditions, especially the lithological and mineralogical conditions (GENESIS appendix report - "Geologie der Referenzregionen im Tonstein"). When this project started, there was little experience, both nationally as well as internationally, in the disposal of heat-generating high-level radioactive waste in clay formations and the subsequent thermo-mechanical-hydraulic behaviour of these clay formations. Parallel to this project the knowledge about the suitability of clay as host rock for a final repository was expanded by other European R&D projects.

During this project, two different disposal concepts were investigated - borehole disposal and drift disposal - for vitrified, high-level radioactive waste and spent fuel elements. For both concepts, thermal design calculations were made. Based on the four model areas, necessary interim storage time, cask spacing as well as borehole or drift spacing were determined. The results were used to estimate the minimum floor space required. A comparison of both disposal concepts shows advantages for both concepts: in drift disposal less interim storage time is necessary than in borehole disposal, in borehole disposal less floor space is necessary than in drift disposal. When taking into consideration thermal aspects, the model areas situated at lower depths (North-1 and South-2) clearly show more advantages than those situated at greater depths (South-1, North-2). In model area North-1, which has the least depth, the floor space necessary for borehole disposal is approx. 2.3 km<sup>2</sup> and for drift disposal between 2.9 km<sup>2</sup> and 3.5 km<sup>2</sup>. This indicates the "homogenous block size" required in a clay formation in Germany.

Stability analyses of the drifts of both disposal concepts were performed for one model area situated at great depth (South-1) and one model area situated at lower depth (North-1). For the borehole disposal concept, the drifts were assumed to be mined and supported by means of concrete with a thickness of 30 cm. For the drift disposal concept, the drifts were assumed to be excavated by means of a tunnel boring machine and supported by means of precast concrete elements. Using the results of numerical calculations, the EDZ, the compressive stress, and the bending moment distribution in the support of both model areas were compared. For model area South-1, the elastoplastic calculations always showed an overload of the drift support while in model area North-1 no overload due to compressive stress could be determined. The thermal influence of the deposited casks was taken into consideration as well. The heat input of the casks leads to an expansion of the rock mass which puts additional stress on the support so that in some parts of model area North-1 the permissible compressive stress was exceeded as well. The influence of the heat input of the casks is demonstrated in an example. This thermal influence should be taken into account in long-term safety proofs. It is inherent in the concepts that the thermally induced stresses in the support are higher in drift disposal than in borehole disposal because in drift disposal, the heat-generating casks are situated within the support while in borehole disposal, the casks are situated below and at a greater distance to the drift.

Additional calculations including time-dependent deformation (creep) were performed for drift stability analysis of borehole disposal concept. The results showed that creep processes are of major importance as these put additional stress on the support. The compressive stress, for instance, was calculated to have doubled after only a few years. When taking into consideration time-dependent deformation, the supports of all model areas were overloaded after a few years. The results showed the geomechanical conditions and thus the conditions for the

support in model area North-1 (depth 335m) to be significantly more advantageous than in model area South-1 (depth 790m).

Uplift calculations showed the surface uplift in all areas to be minor. Thus, uplift needs not be considered when selecting a potential site. Estimates of the temperature rise in the aquifer show model area North-1 to be more advantageous than model area South-1 as in model area North-1 the aquifers are at a greater distance to the disposal site than in model area South-1.

Concepts of the mine layout included the basic drift layout of the final repository. One precondition was the separation of the control areas from the monitoring areas which affects both the ventilation system as well as operating procedures.

As far as the thermal and geomechanical conditions are concerned, model areas North-1 and South-2, which are situated at lower depths than model areas North-2 and South-1, are rated to be "more advantageous" in the summary of the respective investigations. Taking into consideration the spatial limit of model area South-2 as well as the other factors, model area North-1 is the most favored area of the four considered model areas.

What needs to be pointed out is that only few data are available on argillaceous formations suitable as host rocks for a potential final repository in Germany. To facilitate the decision-making process on final disposal, site-specific data are necessary.

The results of this project show that there is need for further clarification where the final disposal in argillaceous formations is concerned both from a conceptual as well as from a material-specific point of view. The disposal concepts developed during this project which allow the disposal of heat-generating waste after manageable interim storage time still have to prove their practical feasibility in in-situ experiments. Another issue to be explored is the use of bentonite as geotechnical barrier which may have to be graphitized. At present, there is little experience in the use of graphite as a means to improve the thermal conductivity of argillaceous material. A further question is whether bentonite is necessary or whether it could be replaced by excavated material, i.e. material present on site. Additionally the effectiveness of the selected geotechnical barrier needs to be proven under realistic heat impact and under mining conditions. Furthermore, the question whether there is thermo-mechanical interaction between filled and/or unfilled boreholes, which influences the time the boreholes stay open and the compressive load on the casks, still needs to be answered.

This report also shows that the material behavior, especially the rheological behavior, of argillite has not yet been sufficiently investigated. For the assessment and prediction of operational safety as well as for the effectiveness of the encapsulation of radioactive waste in argillaceous formations, the rheological material behavior, especially when thermally influenced, is of vital importance. Practical experience shows that investigations on the behavior of argillaceous formations should be site-specific rather than generic.



## 1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Derzeit existiert noch keine konkrete Vorstellung über die mögliche Grubengebäudekonzeption eines Endlagers in einer Tonformation in Deutschland. Ton hat im Unterschied zu den Wirtsgesteinen Salz und Granit ein gänzlich anderes Materialverhalten hinsichtlich thermo-mechanisch-hydraulischer Einflüsse. Dazu kommt, dass Tonsteine hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften eine große Bandbreite überdecken. Tone sind in weicher, plastischer Form ebenso anzutreffen, wie auch in harter, spröder Form. So ist zum Beispiel im weichen Tonstein (vgl. Boom Clay) mit einem erheblichen Maß an Strecken- bzw. Hohlraumausbauten zu rechnen, die in dieser Form in harten Tonen und in den anderen Wirtsgesteinen nicht erforderlich sind.

Bedenkt man die bereits vorhandenen oder geplanten Ausbauten in den Untertage-labors in Tonformationen im europäischen Ausland, den Raumbedarf eines potentiellen kompletten Endlagers sowie mögliche chemische Prozesse im Wirtsgesteins Ton bei hohen Temperaturen, so ist die Notwendigkeit einer detaillierten Untersuchung des Endlagerkonzeptes hinsichtlich der genannten Faktoren gegeben. Insbesondere im Vergleich zu dem Salzkonzept ist mit einem signifikant größeren Raumbedarf bei vergleichbarer Abfallmenge bzw. Wärmeeintrag zu rechnen. Alternativ dazu wäre davon auszugehen, dass die Beladung der Behälter verringert oder die Zwischenlagerzeit erhöht werden müsste.

In diesem Vorhaben wird untersucht, unter welchen Bedingungen und Voraussetzungen die Einlagerung von stark wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfällen in einer Tonformation in Deutschland möglich und sinnvoll ist. Die Auswahl von entsprechenden Modellregionen innerhalb Deutschlands erfolgte in Zusammenarbeit mit der BGR-Berlin, die in ihrer „Regionalen Tonstudie“ aussichtsreiche Tonformationen in Deutschland identifiziert hat. Der Arbeitskreis Endlagerung hat Mindestanforderungen zur Identifizierung von Gebieten aufgestellt, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Teufenlage erfüllen können. Diese bilden eine Basis dieses Vorhabens. Wesentliche Punkte sind im Kapitel 3 aufgeführt.

Ein Ziel ist es, für alle zu betrachtenden Abfallarten bzw. Abfallgebinde eine Geometrie der Einlagerungskonfiguration unter optimaler Raumausnutzung zu bestimmen, ohne das thermische Belastungsgrenzen einer geotechnischen Barriere überschritten werden. Die so ermittelte Konfiguration dient unter anderem als Grundlage, um den minimal notwendigen „Homogenbereich“ einer Tonformation zu quantifizieren.

Ein weiteres Ziel ist es, vor dem Hintergrund des starken Wärmeeintrages anhand von rechnerischen Abschätzungen zum thermo-mechanischen Verhalten des Gebirges, die Stabilität von Einlagerungstrecken eines Endlagers in den ausgewählten Tonformation anhand von Beispielen vergleichend zu bewerten. Dabei ist eine realitätsnahe, ggf. zeitlich gestaffelte, Einlagerung basierend auf dem aktualisierten Abfallaufkommen und der entsprechenden Anlieferungsrate zu berücksichtigen. Insbesondere die unterschiedliche thermische bzw. thermomechanische Wirkung einer senkrechten Bohrlochlagerung gegenüber der einer horizontalen Streckenlagerung im Tongestein soll detailliert untersucht und der jeweilige Mindestraumbedarf ermittelt werden. Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich einer Hebung bzw. Senkung der Tagesoberfläche, die aus der thermischen Expansion bzw. Kontraktion des beeinflussten Gebirgsbereiches entstehen, schließen sich genauso an, wie eine Abschätzung zur Erwärmung eventueller Grundwasserleiter oberhalb des Einlagerungsbereiches.

Am Ende wird, aus Sicht der Endlagerauslegung bzw. Planung, ein Ranking hinsichtlich „*eher günstig*“ oder „*eher ungünstig*“ der untersuchten Modellregionen in Deutschland als Basis weiterer Arbeiten erstellt.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die durchgeführten Untersuchungen und fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen.

## 2 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Im Rahmen des Projektes GEIST (FILBERT 2004b) wurde bereits die Möglichkeit einer Einlagerung wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfälle in einer Tonformationen und vergleichend der Einlagerung im Salzgestein untersucht. Darin wurden die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Folgende Feststellungen wurden in FILBERT (2004b) getroffen:

- Zur Verfüllung von Kammern, Strecken und Bohrlöchern müssen die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt werden. Diese müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert eingebaut werden.
- In Deutschland existiert kein Ton-Bergbau in einer endlagerrelevanten Teufe.
- Es gibt Erfahrungen im Tonstein von der Schachanlage Konrad. Durchzuführende Stabilisierungsmaßnahmen sind formations- und teufenabhängig.
- Aufgrund der Temperaturbegrenzung von 100°C im Tonstein kann nur eine gegenüber der Endlagerung im Salz vergleichsweise geringe Beladung der Behälter erfolgen.
- Für ein Endlagerkonzept im Tonstein sind keine Standorte hinreichend bekannt.
- Grundsätzlich sind Streckenlagerung und Bohrlochlagerung möglich.
- Im Vergleich zur Endlagerung im Salz entstehen im Ton zusätzliche Kosten durch das Verfüllmaterial Bentonit, Stabilisierungsmaßnahmen im Tonstein und das größere Grubengebäude.
- Der wissenschaftlich/technische Kenntnisstand für den Nachweis der Langzeitsicherheit ist im Vergleich zum Salz weniger weit fortgeschritten.

Erfahrungen zum thermischen und mechanischen Verhalten von Tonstein wurden vor allem in den Untertagelaboren Mt. Terri (Schweiz), Bure (Frankreich), Tournemire (Frankreich) und Hades in Mol (Belgien) gesammelt. In Deutschland existiert kein Untertagelabor im Tonstein. Schon bei der Auffahrung dieser Untertagelabore wurden umfangreiche Informationen über tief liegende Tonschichten gesammelt (z. B. Projekt CLIPEX, BERNIER et al. 2001). Informationen lassen sich aber ebenso aus Tiefenbohrungen gewinnen (z. B. Bohrung Benken, NAGRA 2001 oder Bohrung Konrad 101, WITTKÉ 1991). In Europa werden die Tonformationen Opalinuston (NAGRA 2002), Callovo Oxfordian (ANDRA 1999, 2003) und Boom clay (BERNIER et al. 2000) hinsichtlich ihrer Eignung als potentielle Endlagerwirtsgesteine untersucht. Um speziell den Wärmeeinfluss durch einzulagernde Behälter zu bestimmen, wurden und werden Erhitzerversuche im Tonstein durchgeführt:

- HE-B-Versuch in Mt. Terri (HUERTAS & FARIAS 2002)
- Projekt OPHELIE in Mol (DEREEPER et al. 2001)

Neben den Erhitzerversuchen im Tonstein sind die Informationen von Erhitzerversuchen in anderen Gesteinen (bspw. Granit) nützlich, da in diesen Fällen meist auch eine Bentonitummantelung verwendet wurde:

- Projekt DECOVALEX in Kamaishi Mine, Japan (JING et al. 1999, RUTQVIST et al. 2000)
- Long Term Buffer Test in Schweden (KARNLAND et al. 2000)

Numerische Berechnungsmethoden wurden bereits erfolgreich sowohl für thermische als auch thermo-mechanische Problemstellungen im Bereich der Endlagerung angewandt. Das mechanische Verhalten von Tonstein wurde beispielsweise von BLÜMLING und KONIETZKY (2003) und NAGRA (2002) in numerischen Berechnungen untersucht.

Neben den Untersuchungen zum thermo-mechanischen Verhalten von Tonstein wurden für die Bestimmung der Barrierewirkung von Tonstein das hydraulische Verhalten analysiert (JOCKWER et al. 2000).

Die wissenschaftlichen Arbeiten zeigen auf, dass Tonstein ein sehr komplexes thermo-mechanisch-hydraulisches Verhalten. Besonders bei Beachtung der Vielzahl der gekoppelten Prozesse kann zusammengefasst werden, dass der wissenschaftliche Kenntnisstand zur Eignung von Tonsteinen für Endlager gering ist.

### 3 MODELLREGIONEN IN DEUTSCHLAND

#### 3.1 Festlegung der Modellregionen

Um für die sicherheitstechnische Auslegung eines generischen Endlagers im Wirtsgestein Ton in Deutschland einen realitätsnahen Bezug herzustellen, beziehen sich alle Untersuchungen auf die Regionen in Deutschland, die potenziell für einen Endlagerstandort geeignet erscheinen. Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) hat Mindestanforderungen zur Identifizierung von Gebieten aufgestellt, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Teufenlage erfüllen können. Wesentliche Punkte sind im Folgenden aufgeführt (AKEND 2002):

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder Anzeichen von zukünftig zu erwartenden Vulkanismus vorliegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (für Ton mindestens 10 km<sup>2</sup>).
- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149. Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden.
- Die Teufe des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m liegen. Bei Tonsteinformationen unterhalb von 1000 m Tiefe ist jedoch mit sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnissen zu rechnen, was extreme Aufwendungen bei der Auffahrung und dem Betrieb eines Endlagers notwendig macht.

Zusätzliche Schwierigkeiten erwachsen in einem Tiefenbereich > 1.000 m bedingt durch die thermischen Umgebungsbedingungen. Es wurden daher Tonsteinvorkommen nur im Tiefenbereich zwischen 300 und 1.000 m unter Geländeoberkante berücksichtigt.

Tonsteinformationen kommen in Deutschland nach BGR (HOTH et al. 2002a, HOTH et al. 2002b) in unterschiedlichen geologischen Einheiten (Tertiär, Kreide und Jura) und geographischen Regionen vor. Die Wirtsgesteinseignung der Tertiärtone Norddeutschlands wurde aufgrund des geringen Verfestigungsgrades als sehr eingeschränkt beurteilt (vgl. Boom clay, BERNIER et al. 2000). Die tertiären Tone und Tonsteine des Alpenen Vorlandbeckens sind aufgrund ihrer starken lithologischen Variabilität nur schwer charakterisierbar und prognostizierbar. Auch sie weisen nur einen geringen Verfestigungsgrad auf, so dass sie ebenfalls nicht weiter berücksichtigt wurden.

Anhand der oben genannten Mindestanforderungen und Kriterien kommen nur die mächtigen Tonsteinvorkommen in der Unterkreide Norddeutschlands und im Jura Nord- (Dogger  $\alpha$  -  $\gamma$ ) und Süddeutschlands (Dogger  $\alpha/\beta$ ) in Frage. Basierend auf diesen Informationen wurden in der Abstimmung mit der BGR-Berlin geeignete Modellstandorte in diesen Regionen festgelegt und ein entsprechendes geologisches Modell als Auslegungsgrundlage generiert. Folgende Modellstandorte wurden in Nord- und Süddeutschland detailliert untersucht (siehe Anlagenband Geologie):

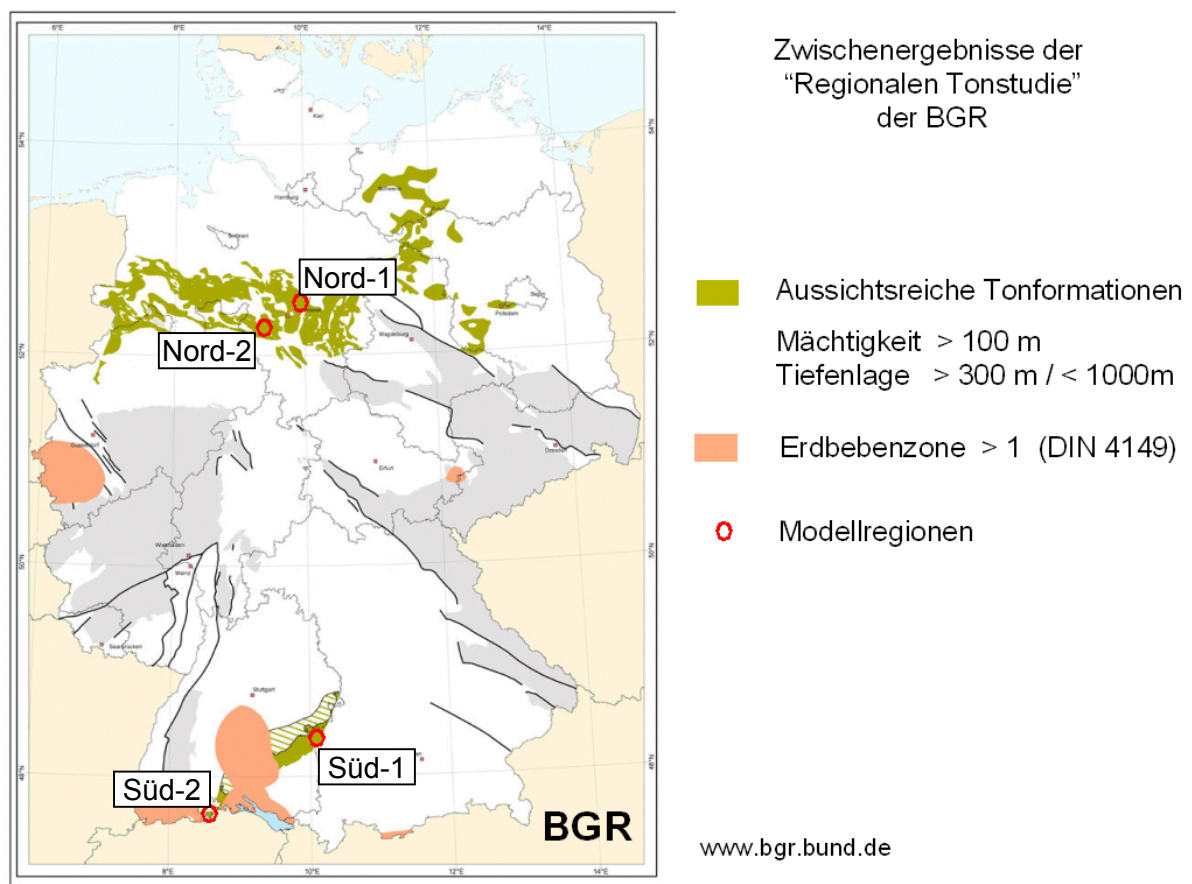
##### in den Unterkreide-Tonen:

- Modell Nord-1 in den Tonen des Mittel Apts (krp) im Ostteil des Niedersächsischen Beckens nördlich von Hannover.

und in den Jura-Tonen:

- Modell Süd-1, Dogger  $\alpha$ , Opalinuston, im Süddeutschen Molassebecken im Raum Ulm.
- Modell Süd-2, Dogger  $\alpha$ - $\beta$ , Opalinuston und Murchisonae-Schichten, im Süddeutschen Molassebecken, im Klettgau Gemeinde Jestetten im deutsch-schweizer Grenzgebiet zum Zürcher Weinland.
- Modell Nord-2, Dogger  $\alpha$ - $\gamma$ , Opalinuston bis subfurcatum-Ton, in der Wesergebirgs-Randmulde (südlichstes Element des Niedersächsischen Beckens) im Raum zwischen Minden und Hameln.

Der geologische Aufbau der Untersuchungsgebiete ist geprägt von einfacher geologischer Architektur, wie sie für das Süddeutsche Molassebecken und das Niedersächsische Becken charakteristisch ist. In den Modellregionen ist Vulkanismus im Prognosezeitraum (1 Millionen Jahre) nicht zu erwarten. Die geographische Lage der Modellgebiete sowie der aussichtsreichen Tonformationen sind in Abbildung 3-1 dargestellt.



**Abbildung 3-1: Karte der untersuchungswürdigen Tonsteinformationen in Deutschland und Lage der Modellstandorte.**

Der Opalinuston und die Unterkreide-Tone sind pyritführend und z.T. bituminöse Erdölmutergesteine mit Gehalten an organischer Substanz ( $C_{org}$ ) von bis zu 6 %, in Ausnahmefällen bis zu 30 % (Unterkreide Tone des Wealdens). Durch den thermischen Einfluss von wärmeentwickelnden Abfällen ist mit Temperaturbelastungen von bis zu 90 °C auf das Wirtsgestein zu rechnen (bis zu 100 °C am Bentonit ergeben bis zu 90 °C am Übergang Bentonit/Wirtsgestein, SCHONEBECK et al. 2004). In diesem Temperaturbereich ist eine Bildung von Kohlenwasserstoffen (thermogene Gase und Erdöl) durch Zersetzung der organischen Substanz möglich. Zur Abschätzung der Konsequenzen (v.a. Gestein/Wasser-Wechselwirkung und Gestein/ $C_{org}$ -Wechselwirkung) wäre es von Vorteil, wenn das Wirtsgestein im Verlaufe seiner Versenkungsgeschichte diese Temperatur bereits erfahren hätte.

Ausreichend mächtige Vitritreflexionsprofile erlauben die Rekonstruktion von Temperaturgradienten zur Zeit der Inkohlung und damit eine Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe und des zu dieser Zeit herrschenden Wärmeflusses. Eine Bearbeitung dieser Problemstellung ist in einem Anschlussprojekt angelaufen.

### 3.2 Thermische Umgebungsbedingungen

Kriterium der thermischen Auslegung ist, dass an keiner Stelle im Tonstein bzw. Bentonit eine Grenztemperatur von 100°C überschritten werden darf. Da es sich bei dem Kriterium zur thermischen Auslegung um einen absoluten Temperaturwert handelt, spielen die regionalen Temperaturverhältnisse im Untergrund eine nicht unbedeutende Rolle. Für die betrachteten Modellgebiete wurden in der Literatur Oberflächentemperaturen zwischen 8,0 °C und 9,5 °C und thermische Gradienten zwischen 0,035 und 0,038 Km<sup>-1</sup> ausgewiesen (JOBMANN 1989, SCHONEBECK et al. 2004, UHLIG et al. 2006, NAGRA 1986, NAGRA 2001).

Vereinfachend wurden nur konstante geothermische Tiefengradienten betrachtet. Eine Zusammenstellung der Temperaturgradienten in den betrachteten Modellgebieten mit deren Tiefenlage zeigt Abbildung 3-2. Die verwendeten Temperaturprofile der vier Modellgebiete sind sehr ähnlich. Da im Tonstein bzw. Bentonit eine Grenztemperatur von 100 °C eingehalten werden sollte, steht je nach Tiefenlage ein gewisser Temperaturbereich für die zusätzliche Wärmeleistung (Behälterleistung) zur Verfügung. Die Modellgebiete Nord-1 und Süd-2 erweisen sich als thermisch günstig mit initialen Gebirgstemperaturen von ca. 25 °C. Dagegen sind die Modellgebiete Süd-1 und Nord-2 aus thermischer Sicht eher ungünstig mit Gebirgstemperaturen bis ca. 45 °C. Hier stehen nur 55 K Temperaturspanne für die Aufheizung durch Behälter zu Verfügung (Abbildung 3-2).

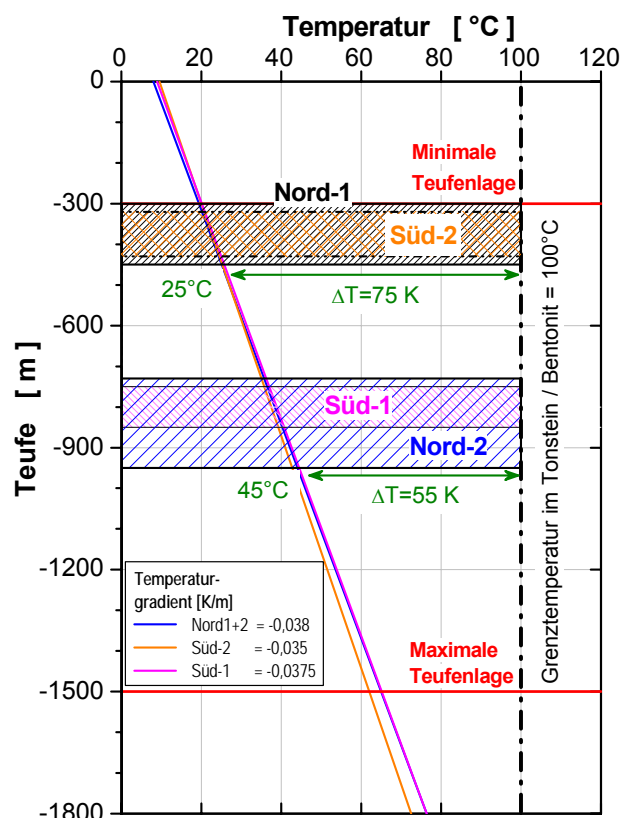


Abbildung 3-2: Temperaturverhältnisse in den 4 Modellgebieten

### 3.3 Beschreibung der Schichtenfolge an den Modellstandorten

#### Modell Nord-1, Unterkreide Tone

Die Abbildung 3-3 zeigt das generische Modell Nord-1 im Niedersächsischen Becken nordöstlich von Hannover. Im Profil sind die sechs Unterkreide-Stufen (Alb-Wealden, grün eingefärbt) abgebildet. Die Schichten lagern annähernd horizontal bei einer flachen Topographie.

Die Schichtenfolge am Modellstandort lässt sich wie folgt charakterisieren (siehe Anlagenband Geologie):

- Die tonig-mergeligen Schichten des Alb stehen oberflächennah bis 250 m Tiefe an. Im Grenzbereich Alb / Apt ist die sogenannte Dunkle Tonstein-Folge aufgeschlossen, die sich durch hohe  $C_{org.}$ -Gehalte (bis 1,6 Massen-%) und Pyrit (akzessorischer Bestandteil, bis zu 1 Massen-%) auszeichnet (WEHNER 1982).
- Das generische Endlagermodell wurde in den Schichten des Mittel Apt, in den Hedbergellen-Mergeln, in einer Referenz-Tiefe von 300 - 400 m entwickelt. Für den Hedbergellen-Mergel ist auf Grund der zu erwartenden höheren Festigkeit gegenüber Tonen eine gebirgsmechanisch günstige Situation zu erwarten. Andererseits sind nur Spuren von Pyrit- und geringe  $C_{org.}$ -Gehalte mit einem unbedeutenden Kohlenwasserstoff-Potential festgestellt worden, so dass die Bildung von sauren Lösung bei Kontakt des Pyrits mit Luftsauerstoff als unbedeutend angesehen werden kann.
- In einer Tiefe von 470 - 700 m folgen die Tone des Unter Apt (Fischschiefer) und des Barrême (mit dem Hauptblättertton des Unter Barrême). Diese Tone variieren in der stofflichen Ausbildung sehr stark, haben hohe Pyrit- und  $C_{org.}$ -Gehalte mit großen Kohlenwasserstoffpotentialen, so dass sie nicht als Einlagerungsschicht betrachtet wurden.
- Die in der Literatur als sehr homogen beschriebenen Hauterive Tone liegen aus thermischer und geomechanischer Sicht in einer eher ungünstigen Tiefenlage, da hier sowohl die Gebirgstemperatur als auch der Überlagerungsdruck wesentlich höher ist als in der Referenz-Tiefe des generischen Endlagers (300 – 400 m).
- Die Ablagerungen des Wealden sind im Bereich des Profils (Tiefe ca. 1.200 – 1.700 m) sandig ausgebildet.

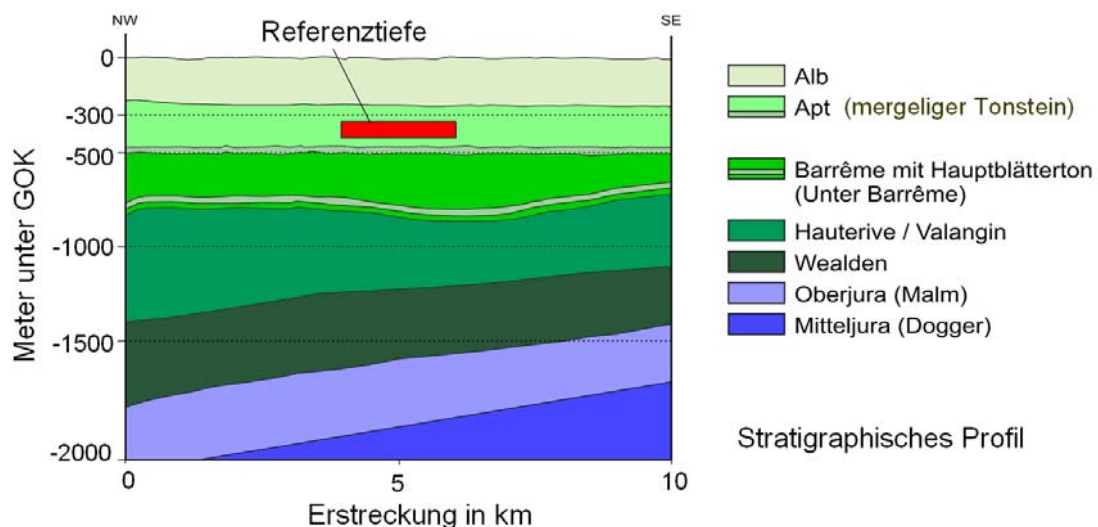


Abbildung 3-3: Stratigraphisches Profil (4-fach überhöht) mit dem generischen Modell Nord-1 im Gebiet nordöstlich von Hannover.

### Modell Süd-1, Dogger $\alpha$

In Abbildung 3-4 ist das generische Modell Süd-1 im Süddeutschen Molassebecken im Raum von Ulm dargestellt. Die känozoischen und mesozoischen Schichten mit dem Opalinuston fallen gleichmäßig flach mit 5-6° nach  $\pm$  SE unter die keilförmig mächtiger werdende Molasse ein. Die Schichtenfolge lässt sich nach BGL (1996) wie folgend lithologisch charakterisieren:



- Die Molasse zeichnet sich durch eine starke Variabilität aus. Sie lässt sich in vier Großabschnitte unterteilen, die durch zweimalige Meeresvorstöße gekennzeichnet sind. Die Obere Süßwassermolasse besteht aus einer Wechselfolge von überwiegend groben Sandsteinen mit Mergel- und Tonsteinen. Für die Obere Meeresmolasse ist eine Wechsellagerung von Ton- und Schluffsteinen mit Sandsteinen charakteristisch. Die Untere Süßwassermolasse besteht aus einer Abfolge von Mergelsteinen, in die untergeordnet Ton- und Feinsandsteine eingeschaltet sind. Die Untere Meeresmolasse besteht aus Tonmergelsteinen, die von Sandsteinen durchsetzt werden.
- Das in einer Teufe von 200 m (NNW) – 300 m (SSE) folgende Malm ist generell die Einheit der hellen Jurakalk-Formationen. Die Ablagerungen des Modells Süd-1 werden der schwäbischen, generell tonreicheren Beckenfazies zugeordnet. Sie besteht aus zwei großen Sedimentationszyklen, die jeweils mit Mergeln (Malm  $\alpha$  und  $\gamma$ ) beginnen und mit Kalken (Malm  $\beta$  und  $\zeta$ ) enden. Die Plattformkarbonate des Malms bilden den regionalen Malm-Karst bzw. -Aquifer.
- Die Ablagerungen des Dogger  $\beta$  -  $\zeta$  zeichnen sich durch Zyklen aus, die mit Tonsteinen beginnen, in sandige und/oder bioklastische Mergel und Kalke übergehen und häufig mit mächtigen, eisenoolithischen Sandsteinen enden.
- Das generische Endlagermodell wurde im Opalinuston (Dogger  $\alpha$ ) in einer Referenz-Tiefe von 750 - 850 m bezogen auf die Geländeoberkante entwickelt.
- Darauf folgt ein geringmächtiger Lias, der aus Tonsteinen und untergeordnet Mergel- und Sandsteinen besteht.
- Den Abschluss der sedimentären Abfolge bildet der Keuper, die jüngste Serie der Trias, bestehend aus Sandsteinen sowie untergeordnet Mergel- und Tonsteinen.
- Das kristalline Grundgebirge ist sehr komplex aufgebaut. Es umfasst große Areale mit vorwiegend Paragneisen und Zonen mit gehäuftem Auftreten von Metabasiten, leukokraten Orthogneisen und Metakarbonaten. Vielfach sind granitische Plutone in die älteren Gesteinskomplexe intrudiert und auskristallisiert.

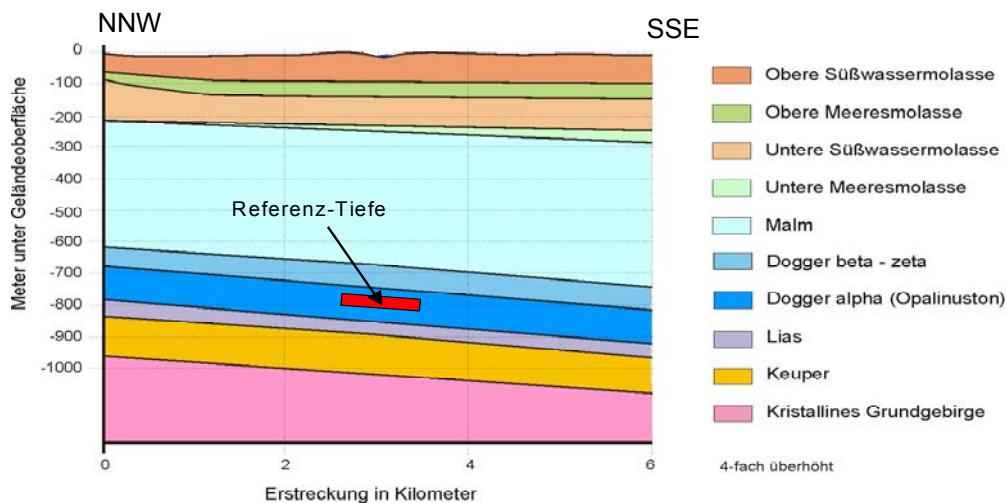


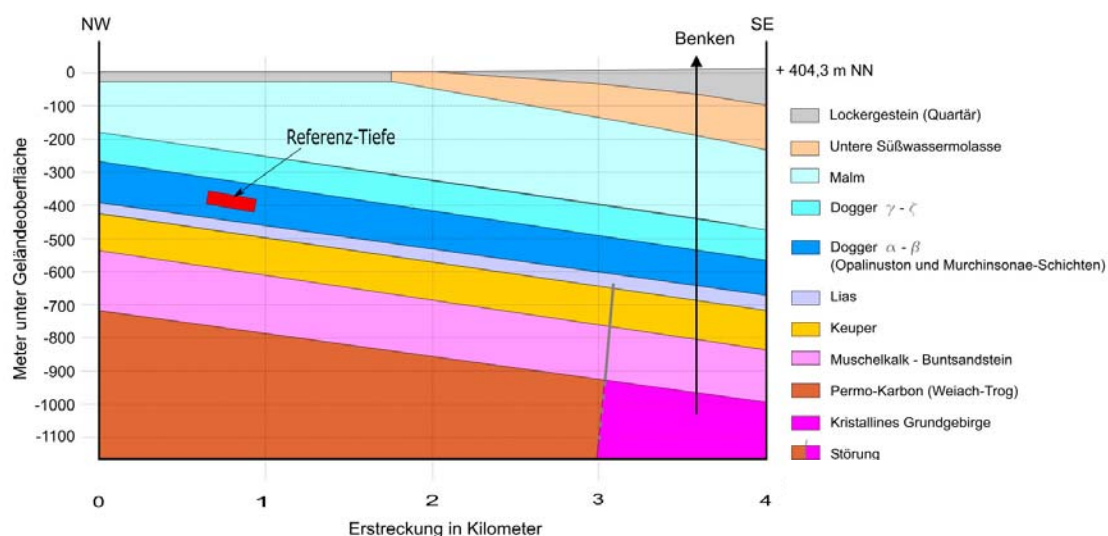
Abbildung 3-4: Stratigraphisches Profil mit dem generischen Modell Süd-1 im Gebiet um Ulm (JOBMANN 2004).

### Modell Süd-2, Dogger $\alpha/\beta$

Die Abbildung 3-5 zeigt das generische Modell Süd-2 im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Nordschweiz mit der Sondierbohrung Benken. Die mesozoische Schichtenfolge (Buntsandstein – Malm) weist ein generelles Schichteneinfallen von ca. 3-4° in Richtung SE auf. Das Modellgebiet liegt in der Nähe der Sondierbohrung Benken (Nordschweiz), so dass davon ausgegangen wird, dass die dort von der NAGRA (2002) erfassten Gesteinsparame-

ter auf die Schichtenfolge von Jestetten übertragbar sind. Die Schichtenfolge des Profils kann wie folgt beschrieben werden (siehe Anlagenband Geologie):

- Die quartären Sedimente stellen Reste ausgedehnter grobdetritische, fluviatile Sedimentkörper und Seeablagerungen dar. Diese Ablagerungen bestehen größtenteils aus Schottern.
- Im SE des Modellgebietes ist die tertiäre Untere Süßwassermolasse aufgeschlossen. Die bis zu 130 m mächtige Abfolge wird von siltig-sandigen Sedimenten gebildet. Bereichsweise treten auch kalkige Ablagerungen auf.
- Die Ablagerungen des Malms betragen annähernd 300 m. Der obere Teil (Malm  $\zeta$  -  $\gamma$ ), der aus mächtigen Plattformkarbonaten besteht, bildet den regionalen Malm-Aquifer. Der untere Teil (Malm  $\alpha$  -  $\beta$ ) ist geringmächtig und tonig ausgebildet. Die Ablagerungen des Malms des Modells Süd-2 werden nicht der schwäbischen, generell tonreicheren Beckenfazies (Süddeutschland, Modell Süd-1) zugerechnet, sondern dem Übergangsbereich zur keltischen, generell karbonatreichen Plattformfazies (Nordwestschweiz).
- Die darauf folgenden Schichten des Dogger  $\zeta$  -  $\gamma$  setzen sich zusammen aus einer Abfolge von Tonsteinen, Mergeln, Kalksteinen und Sandsteinen, die z.T. Eisenoxide führen. Die Weselsandsteinformation (Dogger  $\gamma$ ), sandige Mergel und mergelige Sandsteine, stellen die obere Grenze des Wirtsgesteines dar.
- Das Wirtsgestein besteht aus dem Opalinuston (Dogger  $\alpha$ ) und den tonig ausgebildeten Murchisonae-Schichten (Dogger  $\beta$ ). Das generische Endlagermodell wurde in einer Referenz-Tiefe von 350 - 400 m entwickelt.
- Die Lias-Ablagerungen sind geringmächtig (ca. 40 m) und bestehen überwiegend aus tonreichen, z.T. auch sandigen Sedimenten und untergeordnet marinen Kalkbildungen.
- Der annähernd 120 m mächtige Keuper wird dominiert von einer Wechsellagerung von Kalk- und Mergelsteinen, Tonsteinen und Sandsteinen.
- Der Muschelkalk besteht aus zunächst kalkigen, dann evaporitischen Ablagerungen, die wiederum in kalkige Sedimente übergehen. Darauf folgt ein nur einige Meter mächtiger Buntsandstein aus fluviatilen Sandsteinen.
- Das kristalline Grundgebirge, inkl. paläozoische Sedimente der Nordschweizer Permo-karbontröge, stellt die letzte tektonische Groseinheit im Modellgebiet dar. Das Kristallin besteht aus mehrfach überprägten und deformierten Paragesteinen wie Metapeliten und Metagrauwacken, Graniten, karbonatreichen Intrusiva sowie untergeordnet auch Orthogneisen. Für die Sedimente des Permokarbons, die auf der Hochzone von Benken nicht angetroffen wurden, sind im unteren Teil Sandstein-/Konglomerat-Serien und im oberen Teil feinklastische Sand-, Silt- und Tonsteine charakteristisch.

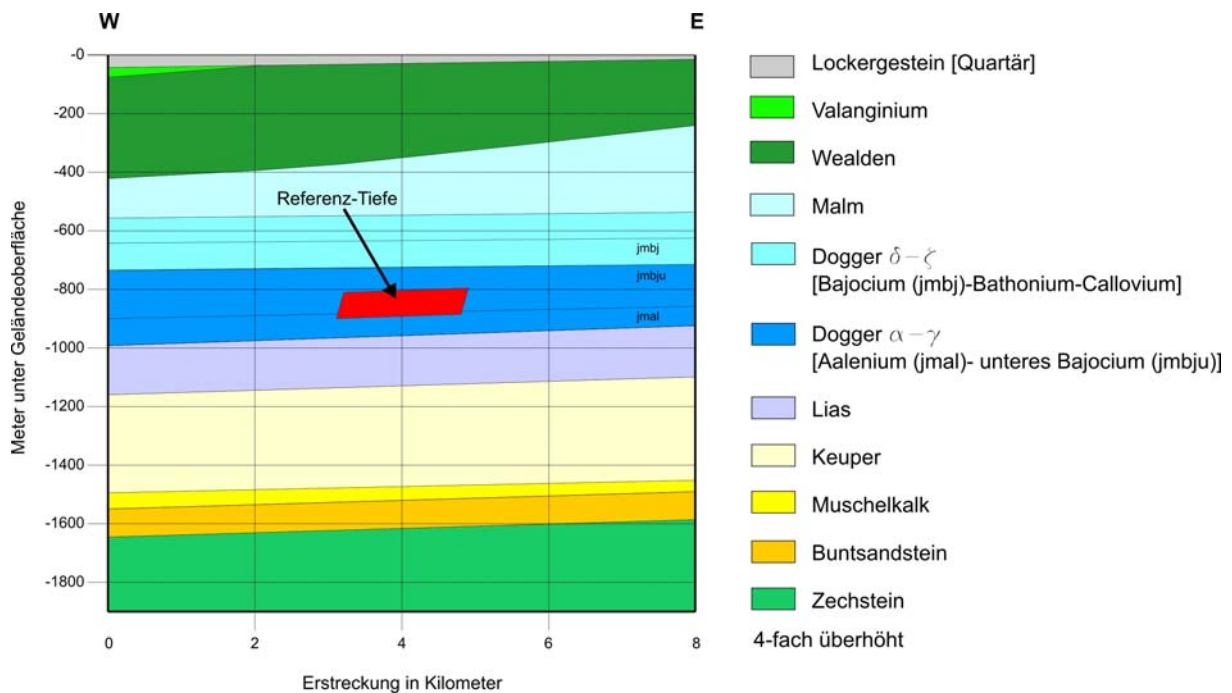


**Abbildung 3-5: Generisches Modell Süd-2 im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Schweiz mit der Sondierbohrung Benken**

### **Modell Nord-2, Dogger $\alpha$ - $\gamma$**

Die Abbildung 3-6 zeigt das generische Modell Nord-2 im Raum zwischen Minden und Hameln im südlichen Niedersächsischen Becken. Die Schichten lagern annähernd horizontal bei einer flachen Topographie. Die Schichtenfolge am Modellstandort lässt sich wie folgt charakterisieren (siehe Anlagenband Geologie):

- Die Schichtenfolge beginnt mit nur einige Meter mächtigen, quartären Tonen, Sanden und Kiesen, die nach Osten in Mergel übergehen.
- Das Valangin, das nur im Westen des Untersuchungsgebietes aufgeschlossen ist, wird von sandigen Tonsteinen und Tonmergelsteinen vertreten.
- Die Sedimente des Wealdens werden bis zu 250 m mächtig. Sie sind sandig-tonig ausgebildet, vereinzelt treten Kalksteine auf.
- Darauf folgt der Malm mit dem Serpilit - eine tonig-mergelige bis kalkige, z.T. auch anhydritischen Gesteinsserie. Für das Tithon, Kimmeridge und Oxford sind Kalk- und Tonsteine charakteristisch, die bereichsweise auch sandig ausgebildet sein können. In diesen Abfolgen wurden Verkarstungserscheinungen festgestellt.
- Der Dogger  $\zeta$  –  $\delta$  umfasst die Zeitstufen Bajocium, Bathonium und Callovium. Das Callovium (Dogger  $\zeta$ ) ist mit maximal 50 m geringmächtig ausgebildet. Lithologisch gesehen handelt es sich beim Callovium um Ton- und Mergelsteine mit Kalkstein-Lagen. Das Bathonium und das Bajocium bis zum Dogger  $\delta$  ist in Cornbrash-Fazies ausgebildet. Es treten Sandsteine, kalkig, teils tonig, Tonsteine und Mergelsteine auf. Diese Abfolge bildet die obere Grenze des Wirtsgesteins.
- Das Wirtsgestein besteht aus den Schichten des unteren Bajociums (Dogger  $\gamma$ ) und des Aaleniums (Opalinuston, Dogger  $\alpha$  und Ludwigien-Ton, Dogger  $\beta$ ). Die Ablagerung sind tonig, schwach dolomitisch, bereichsweise schluffig. Das generische Endlagermodell wurde in einer Referenz-Tiefe von 800 - 900 m entwickelt.
- Die Lias-Ablagerungen bestehen aus Ton- und Mergelsteinen mit Kalkstein-Lagen, die nach Osten hin schwach siltig ausgebildet sein können.
- Die darauf folgenden triassischen Schichten (Keuper, Muschelkalk und Buntsandstein), von denen der Muschelkalk am geringmächtigsten ausgebildet ist, bestehen aus Ton-, Mergel- und Sandsteinen (Keuper), Karbonatgesteinen (Muschelkalk) sowie aus mächtigen Sandstein/Tonstein-Wechselagerungszyklen (Buntsandstein).
- Den Abschluss des Profils bilden die mehrere hundert Meter mächtigen Zyklen des Zechstein-Salinars.



**Abbildung 3-6: Generisches Modell Nord-2 im Raum zwischen Minden und Hameln im südlichen Niedersächsischen Becken.**

### 3.4 Modellgebiete und ihre geologische Situation

#### 3.4.1 Modell Nord-1, Unterkreide-Tone

Unterkreide Sedimente von großen Mächtigkeiten und weiter Verbreitung sind im Niedersächsischen Becken (NSB) aufgeschlossen. Das NSB ist ein Schollenrandtrog, das bedeutendste Element in der Kette der südlich der Nordsee gelegenen Epikontinental-Becken. Die Unterkreide (Alter: 144 - 99 Millionen Jahre, Dauer: 45 Millionen Jahre) wird in 6 Stufen untergliedert:

- Wealden/Berrias (144 – 137 Millionen Jahre),
- Valangin (137 – 132 Millionen Jahre),
- Hauterive (132 – 127 Millionen Jahre),
- Barrême (127 – 121 Millionen Jahre),
- Apt (121 – 112 Millionen Jahre) und
- Alb (112 – 99 Millionen Jahre).

Das NSB ist ein relativ kleines Becken mit einer durchschnittlichen Nord-Süd Erstreckung von 80 km und einer Ost-West Länge von etwa 280 km. In Abbildung 3-7 werden die auch von anderen Systemen bekannten, lateralen Faziesunterschiede im NSB deutlich. In der Abbildung sind die Ablagerungsbedingungen während des Hauterive dargestellt. Eine sandige Randfazies (klastische Litoralfazies) ist häufig von einer mergelig-tonigen Beckenfazies zu unterscheiden. Die Ablagerungen der Beckenfazies sind im allgemeinen durch einen geringen Festlandeinfluss homogener aufgebaut.



Im östlichen Teil des NSB konnten mehrere Referenzgebiete ausgewiesen werden, die den AkEnd-Mindestanforderungen entsprachen. Eine Optimierung des Modellstandortes erfolgte an Hand von Abwägungskriterien. Als Abwägungskriterien, die sich auf die geologische Gesamtsituation (Wirtsgestein und Nebengestein) an einem Modellstandort vorteilhaft auswirken, wurden z.B. die Variabilität in der stofflichen Ausbildung der Tongesteine unter Berücksichtigung der Pyrit- und C<sub>org</sub>-Gehalte, die gebirgsmechanischen Eigenschaften der Einlagerungsschicht und die Tiefenlage herangezogen.

Die Valangin-, Hauterive-, Mittel-/Ober-Apt- und Alb-Tone der Beckenfazies sind im allgemeinen homogener aufgebaut als die Wealden-, Barrême-, Unter-Apt Tone und dadurch verhältnismäßig einfach zu charakterisieren. Kennzeichnend für die Blättertone des Wealden, Barrême, und Unter-Apt sind hohe Gehalte an Pyrit und organischer Substanz mit hohen Kohlenwasserstoffpotentialen, die auf das anoxische Bildungsmilieu dieser Sedimente hinweisen (GAIDA et al. 1981, KEMPER et al. 1978, MÜLLER 1995, RULLKÖTTER et al. 1995). Aus diesem Grund erschien es nicht sinnvoll, ein generisches Endlagermodell in den Unterkreide-Tonen des Wealden, Barrême und Unter Apt zu entwickeln.

Das generische Endlagermodell Nord-1 wurde nördlich von Hannover in den Schichten des Mittel-Apt, dem Hedbergellen-Mergel, entwickelt. Das Gebiet liegt in der Erdbebenzone 0. Die Mächtigkeit der Hedbergellen-Mergel beträgt weiträumig 200 m und steigt auf bis zu 250 m an (KEMPER 1995). In diesem Gebiet wurde für drei Teilgebiete eine flächenmäßige Ausdehnung des Wirtsgesteines von ca. 100 km<sup>2</sup> festgestellt. Die Teilgebiete sind durch Grabenstrukturen (Graben nördlich von Heesel und Burgdorfer Graben) voneinander getrennt, wobei nur beim Burgdorfer Graben Versatzbeträge von mehreren Zehnermetern beobachtet wurden.

Auch aus bergbaulicher Sicht wurde ein mergeliger Tonstein als Einlagerungsschicht ausgewählt, da er höhere Festigkeiten aufweist als ein reiner Tonstein. Die Festigkeit wird vornehmlich durch den Anteil an Nichttonmineralen bestimmt. Dabei ist die Tendenz zu beobachten, dass die Festigkeit mit zunehmendem Tongehalt abnimmt, aber gleichzeitig ein plastisch-duktiler Materialverhalten zu beobachten ist. Tonsteine mit Tonmineralgehalten von mehr als 70 % weisen eher geringe Festigkeitswerte auf. Mit abnehmendem Tonmineralgehalt und zunehmenden Kalk- oder Quarzgehalt steigt die Festigkeit an (UHLIG et al. 2006).

### **Lithologie**

Die Hedbergellen-Mergel werden im westlichen und zentralen Teil des NSB z.T. vertreten durch die Ewaldi-, Clava- und Inflexus-Mergel. In diesen Mergeln schwanken die Karbonat-Gehalte ebenfalls wie in den Laminten des Barrême, allerdings auf höherem Niveau. Es liegt eine Wechsellagerung von dunklen, tonigeren und helleren, karbonatreicheren Bänken vor. Die Bänke der Wechsellagerung haben eine überregionale Verbreitung wie geophysikalische Logs und ihre Korrelation beweisen.

#### **3.4.2 Modelle Süd-1, Süd-2 und Nord-2, Jura-Tone**

Der Jura (Alter: 206 - 144 Millionen Jahre, Dauer: 62 Millionen Jahre) wird unterteilt in die Epochen bzw. Abteilungen:

- Lias (206 – 180 Millionen Jahre)
- Dogger (180 – 159 Millionen Jahre)
- Malm (159 – 144 Millionen Jahre).

Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen erfüllen in Süddeutschland die Tonsteine des Dogger  $\alpha$  (unteres Aalenium, Opalinuston), bereichsweise auch des Dogger  $\beta$  (oberes

Aalenium, Murchisonae-Schichten). In Norddeutschland reicht die tonige Fazies vom Dogger  $\alpha$  bereichsweise sogar bis zum Dogger  $\gamma$  (Unteres Bajocium, subfurcatum-Ton).

Die Modellgebiete Süd-1 und Süd-2 liegen im Süddeutschen Molassebecken. Das Süddeutsche Molassebecken umfasst weite Teile Süddeutschlands und der Nordschweiz. Das Becken wird im Norden von der Schwäbischen und Fränkischen Alb begrenzt. Erdgeschichtlich stellt dieser Ablagerungsraum ein geologisch einfaches, tektonisch ruhiges Gebiet am Rand des Einflussbereiches der Alpen dar. In der Tertiärzeit setzte jedoch im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung eine Intensivierung der tektonischen Vorgänge ein.

Das Modellgebiet Süd-1 befindet sich südlich der Schwäbischen Alb im Raum Ulm. Dort erreicht der Opalinuston eine Mächtigkeit von 120 m. Eine ausreichend mächtige Gesteinsüberdeckung ist vorhanden. Eine Einschränkung der Nutzung durch den ausgedehnten Malmkarst-Grundwasserleiter im Deckgebirge - wie in der Schwäbischen Alb gegeben - liegt nicht vor. Es sind keine intensiven tektonischen Aktivitäten ausgehend vom Hohenzollern-Graben im Westen und dem „Schwäbischen Lineament“ im Norden zu erwarten. Eine homogene, flächenhafte Ausdehnung des Wirtsgesteins ist über mehrere 100 km<sup>2</sup> gegeben.

Das Untersuchungsgebiet Süd-2 Jestetten stellt fast eine „Enklave“ oder Insel auf dem Gebiet der Schweiz dar, die nur im Westen eine wenige Kilometer breite Verbindung nach Deutschland aufweist. Der Opalinuston wurde in einer Mächtigkeit von ca. 110 m angetroffen. Das Gebiet umfasst eine Fläche von etwas mehr als 10 km<sup>2</sup>. Es liegt in der Erdbebenzone 1 im Randgebiet zur Erdbebenzone 2. Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten laut BGR Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden (HOTH 2005, persönliche Mitteilung).

Das Modellgebiet Nord-2 erstreckt sich über die Wesergebirgs-Randmulde und die Quetzer Struktur, die die südlichsten, tektonischen Elemente des Niedersächsischen Beckens darstellen. Die zu untersuchenden Jura-Tone (Dogger  $\alpha - \gamma$ ) weisen im Untersuchungsgebiet eine Mächtigkeit von 280 m im Westen und 200 m im Osten auf. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich verfügt über eine flächenmäßige Ausdehnung von ca. 450 km<sup>2</sup> und befindet sich in der Erdbebenzone 0 (HOTH 2005, persönliche Mitteilung). Der nordwestliche Teil des Untersuchungsgebietes zwischen den Rehburger Bergen und den Bückebergen wird als ein tektonischer Beanspruchungsraum beschrieben, der Aufweitungstendenzen zeigt und sich durch ein komplexes WNW-ENE streichendes Schollensystem mit Graben und Horststrukturen auszeichnet. Störungen innerhalb des Modellgebietes wurden nicht festgestellt.

### **Lithologie und Fazies**

Der Opalinuston (Dogger  $\alpha$ ), der seinen Namen von häufigen Fossilfunden des Ammoniten *Leioceras opalium* bekam, wurde im Bereich der Süddeutschen Molassebeckens in einem flachen, epikontinentalen Randmeer mit maximalen Wassertiefen von wenigen Dekametern abgelagert. In diesem Gebiet unterscheidet man zur Zeit des Opalinustons großräumig zwei Faziesbereiche, nämlich die keltische, generell karbonatreiche Plattformfazies (Nordwestschweiz, z.B. Mont Terri) und die schwäbische, generelle tonreichere Beckenfazies (Nordostschweiz und Süddeutschland). Das Modellgebiet Süd-1 liegt in der schwäbischen, generell tonreicheren Beckenfazies, wohingegen sich das Referenzgebiet Süd-2 im Übergangsbereich dieser Faziesräume befindet.

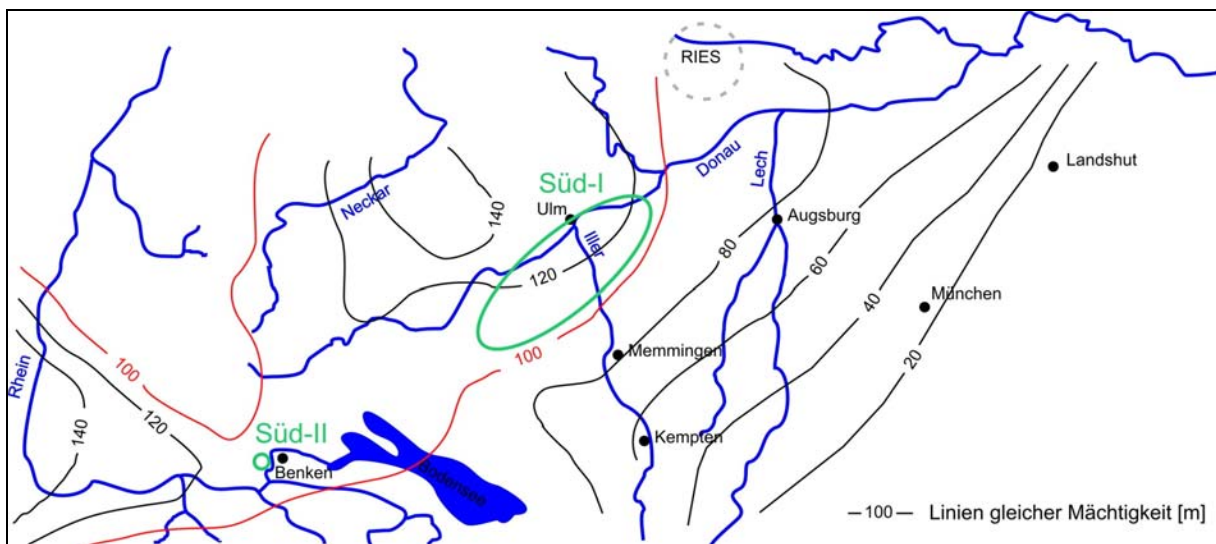
Im Süddeutschen Molassebecken wurden im Dogger Mächtigkeitsunterschiede festgestellt. Die Mächtigkeit nimmt von Mont Terri (karbonatreiche Plattformfazies, westlich der Aare) in Richtung Randen-Klettgau-Gebiet (Modellgebiet Süd-2) ab. Im Randen-Klettgau-Gebiet scheint ein lokales Minimum zu sein, wobei vor allem der Dogger  $\alpha$ , der Opalinuston, sehr geringmächtig entwickelt ist, jedoch immer noch eine Mächtigkeit von über 90 m aufweist (HOFMANN 1981, BAUSCH & SCHOBER 1997). Hier reicht jedoch die tonige Opalinuston-Fazies bis in stratigraphisch jüngere Schichten, da die Murchisonae-Schichten (Dogger  $\beta$ )

tonig und nicht in ihrer typischen, kalkreichen Ausbildung des keltischen Faziesbereiches ausgebildet sind.

Die Mächtigkeit des Opalinustons nimmt vom Randen-Klettgau-Gebiet aus nach Norden zur Schwäbischen Alb (Modellgebiet Süd-1) hin dann wieder generell auf bis zu 150 m zu, geht hier aber im Dogger  $\alpha$  schon in die sandreiche Fazies der Wasserfallschichten über. Bei den Wasserfallschichten, eine mehr oder weniger geschlossene Folge von Sandmergelbänken, handelt es sich sehr wahrscheinlich um eine asynchrone Fazies, die während des Dogger  $\alpha$  von der Böhmisches Masse, dem Hauptliefergebiet von sandigem Material zur Zeit des Doggers, beckeneinwärts Richtung Westen wanderte (SCHMIDT 1996).

Auf dem biostratigraphischen Niveau der Murchisonae-Schichten (Dogger  $\beta$ ) sind regional drei Faziesbereiche zu unterscheiden: eine kalkreiche Fazies im Westen (Mont Terri), eine tonreiche Fazies im Gebiet Benken-Randen-Wutachtal (Modellgebiet Süd-2) und eine sandreiche Fazies im Bodenseegebiet und in ganz Süddeutschland (Modellgebiet Süd-1).

In der Abbildung 3-8 ist im Bereich des Modellgebietes Süd-2 (Raum Klettgau-Zürcher Weinland) die Mächtigkeitsverteilung der Opalinuston-Fazies (Opalinuston und Murchisonae-Schichten) dargestellt. Dahingegen ist in Süddeutschland ausschließlich die Mächtigkeit des auf den Dogger  $\alpha$  begrenzten Opalinustons zu sehen. Zudem sind die geographische Lage der Modellgebiete Süd-1 Ulm, Süd-2 Jestetten sowie die der Bohrung Benken eingetragen.



**Abbildung 3-8: Mächtigkeitsverteilung des Opalinustons in Süddeutschland mit der Lage der Modellgebiete Süd I, Süd II und der Bohrung Benken. Die Mächtigkeitsverteilung des Opalinustons wurde erstellt auf Basis von (NAGRA, 2002), (SCHMIDT, 1996) und (BGL, 1996).**

Die Tonsteine des Dogger  $\alpha$  führen im Bereich des Modellgebietes Süd-2 dünne Silt- und Sandsteinlagen bzw. Sandsteinlinsen sowie bräunliche Sideritkonkretionen in unterschiedlichem Ausmaß. Aufgrund der An- bzw. Abwesenheit von Sand- und Siltsteinlagen, bzw. von Sideritkonkretionen kann der Opalinuston in makroskopisch und mikroskopisch fünf unterscheidbare Abschnitte gegliedert werden (von unten nach oben bzw. vom Älteren zum Jüngeren, NAGRA 2002a):

- sandarmer, fossilreicher Opalinuston,
- sandarmer Opalinuston mit gelblichen Sideritkonkretionen und wenig Sandsteinlagen,
- Opalinuston mit zahlreichen Sandeinlagen,
- Opalinuston mit knolligen Karbonatbänken und relativ wenig Sand und
- Opalinuston mit Sandmergel.



Die im Raum Randen-Klettgau in Opalinuston-Fazies ausgebildeten Murchinsonae-Schichten (Dogger  $\beta$ ) bestehen aus kalkig, siltigen bis feinsandigen Tonsteinen mit wenigen, kalkig zementierten Feinsandsteinlagen, d.h. sie zeigen die Fazies des obersten Opalinustons.

Informationen über die Ausbildung des Opalinustons im Bereich von Ulm (Modell Süd-1) liegen nicht vor. Die Lithologie des Opalinustons wird sich aber durch die Nähe zum Böhmisches Massiv von der oben beschriebenen Ausbildung im Bereich des Modells Süd-2 unterscheiden. Im oberen Bereich der Abfolge ist vermehrt mit silikatischen Einschaltungen zu rechnen.

In Norddeutschland (Modell Nord-2) wurde der Opalinuston im Unterschied zu Süddeutschland in einer landfernen Hochseeregion abgelagert. Nur im Südosten des Referenzgebietes und da auch nur im oberen Teil zeigen die Tonsteine durch die räumliche Nähe zum Festland der Rheinischen Masse einen merklichen Sandgehalt und leiten so zu der hier stark sandigen Fazies (z.B. des Dogger  $\beta$ ) über. Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen erfüllen neben dem Opalinuston auch die im Hangenden folgenden Tonsteine bis zum Dogger  $\gamma$  (unteres Bajocium, subfurcatum-Ton). Die Lithofazies der Wirtsgesteinsformationen ist gekennzeichnet durch schwach siltige und dolomitische, pyritführende Tonsteine mit Tonanteilen von  $\geq 80\%$ . Bereichsweise sind in die Tonsteine sandige Mergelsteine eingeschaltet (HOTH 2005, mündliche Mitteilung).

### 3.5 Mineralogie der Wirtsgesteine

Tonsteine sind Mineralgemenge, in denen die Tonminerale im Vergleich zu weiteren beigemengten Mineralphasen, wie Quarz, Feldspat, Carbonaten oder auch organischer Substanz dominieren. Sie entstehen durch eine Verfestigung von tonhaltigen Sedimenten, wie marine oder limnische Schlämme. Bei der Verfestigung finden neben der Porositätsabnahme in Folge eines Druck- und/oder Temperatureinflusses auch vielfältige chemisch-mineralogische Wechselwirkungen statt, die unter dem Begriff der Diagenese zusammengefasst werden. Die mineralogische Zusammensetzung der Tonsteine beeinflusst zahlreiche geochemische, thermische und felsmechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins.

Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung des Opalinustons in Süddeutschland (Modell Süd-1) und der Nordschweiz im Bereich des Modells Süd-2 sowie des Hedbergellen-Mergels (Mittel Apt) des Niedersächsischen Beckens (Modell Nord-1) zeigt Tabelle 3-1. Daten zur Mineralogie der Tonsteine des Aaleniums und des unteren Bajociums im Bereich des Modellgebietes Nord-2 sind nicht veröffentlicht bzw. konnten nicht verfügbar gemacht werden.

Die Hauptkomponenten sind Schichtsilikate (54 – 64 %), Quarz (19 – 30 %) und die Karbonate (Calcit, Dolomit und Siderit). Die Tonminerale Illit und Kaolinit treten sowohl im Opalinuston als auch im Hedbergellen-Mergel auf, die Illit/Smektit-Wechselagerungsminerale nur im Opalinuston. Smektite, deren spezifische Oberfläche und Kationenaustauschkapazität (Montmorillonit: ca. 100 mval/100g) sehr viel höher sind als die von Illiten (ca. 40 mval/100g) und die von Kaolinit (ca. 10 mval/100g), wurden nur in den Hedbergellen-Mergel festgestellt. Als Nebenkomponten wurden das Tonmineral Chlorit, Feldspäte, Pyrit und organische Bestandteile beobachtet. Pyrit, ein Faziesanzeiger für reduzierende Ablagerungsbedingungen, ist nahezu immer in Tonen zu identifizieren, jedoch in den Hedbergellen-Mergel nur in Spuren.

**Tabelle 3-1: A) Mineralogischer Stoffbestand des Opalinustons Süddeutschlands nach HEKEL (1989) und RIEDEL (1989)**  
**B) Durchschnittliche Zusammensetzung des Opalinustons der Nordschweiz (NAGRA, 2002)**  
**C) Mineralogische Gesamtzusammensetzung des Hedbergellen-Mergels des Niedersächsischen Beckens nach KÜHN (1994)**

Mineral	A	B Mittelwert (Standardabweichung)	C
Stratigraphie	Opalinuston	Opalinuston	Hedbergellen-Mergel
Illit	25	18 (6)	34
Kaolinit	16	17 (6)	19
Illit / Smektit	13	14 (4)	
Smektit			11
Chlorit	4	5 (2)	
Σ Schichtsilikate	58	54	64
Quarz	30	20 (5)	19
Calcit	6	16 (10)	12
Dolomit / Ankerit		1 (0,4)	
Siderit	3	4 (2,4)	
Feldspat		3 (1,3)	< NWG
Pyrit	1 (≤ 3)	1,1 (1)	Spuren
Akzessorien	2		
Organischer Kohlenstoff	≤ 1,6	0,6 (0,3)	1
Sonstige Minerale			4

(Die Nachweisgrenze (NWG) beträgt für moderne röntgenographische Methoden ca. 3 % bei Alkalifeldspäten.)

## 4 BETRACHTETE EINLAGERUNGSVARIANTEN

Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten der Einlagerung betrachtet:

- Bohrlochlagerung
- Streckenlagerung

### 4.1 Bohrlochlagerung

Das Konzept Bohrlochlagerung beinhaltet die Auffahrung von Zugangsstrecken für den Transport der Einlagerungsbehälter. Von diesen Strecken aus werden 50 m tiefe, vertikale Bohrlöcher erstellt. Der Bohrlochdurchmesser beträgt zwischen 1,03 und 1,43 m, je nachdem welche Endlagerbehälter und Behälterummantelungen angesetzt werden (Abbildung 4-5, S. 21). Für den Bohrlochverschluss wird ein Bentonit-Stopfen einer Länge von 2,5 m angenommen.

Im Bohrloch ist die Endlagerung von HAW-Kokillen oder Brennstab-Kokillen vorgesehen (vgl. Abb. 4-2 und 4-3). Aufgrund des gleichen Durchmessers beider Behälter kann der gleiche Bohrlochdurchmesser verwendet werden. Nach dem derzeitigen Planungsstand wird ein Querschnitt der Strecken, in denen sich die Einlagerungsbohrungen befinden, mit ca. 8,0 m Breite und ca. 7,0 m Höhe berücksichtigt.

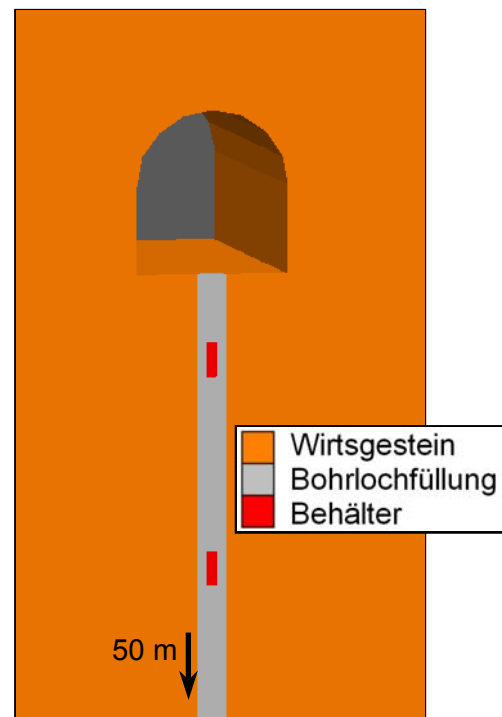


Abbildung 4-1: Schema der Bohrlochlagerung

Die Geometrien der einzelnen Behälter und ihre Wärmeleistungen werden im Folgenden beschrieben.

## Behältertypen und ihre Wärmeleistung

### HAW-Kokille

Die beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehende wässrige Spaltprodukt-Lösung wird aufkonzentriert und in einem keramischen Schmelzer mit Glasfritte zu einem Borosilikatglasprodukt verarbeitet. Die flüssige Glaschmelze wird dann in einen Edelstahlbehälter abgefüllt, welcher mit einem Deckel verschweißt wird. Eine COGEMA-HAW-Kokille enthält die Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung von ca. 1,67 t SM.

Die Stapelhöhe der Kokille beträgt 1,335 m. Weitere geometrische Daten zu den Glaskokillen sind in Abbildung 4-2 angegeben. Die Wärmeleistung kann der Abbildung 4-4 entnommen werden.

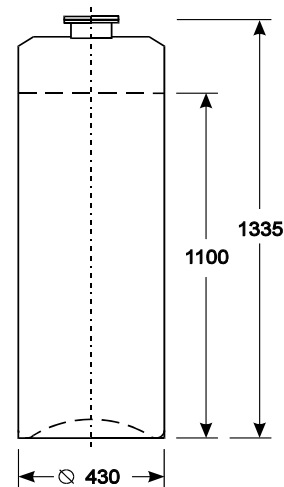


Abbildung 4-2: HAW-Kokille

### Brennstabkokille

Die Brennstabkokille BSK-3 (Abbildung 4-3) wurde zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus drei DWR-Brennelementen oder 9 SWR-Brennelementen in 2 Brennstabbüchsen entworfen. Die Geometrie des Behälters korrespondiert weitgehend zur HAW-Kokille. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit identischen Hebezeugen und die Einlagerung in adäquaten Bohrlöchern.

Im Folgenden wird die Brennstabkokille unter Annahme einer Mischbeladung mit 90 % Uran und 10 % Mischoxid (Uran90%-MOX10%) betrachtet. Die Wärmeleistung ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

Eine reine MOX-Beladung wurde nicht betrachtet, da ihre Wärmeleistung überproportional hoch wäre.

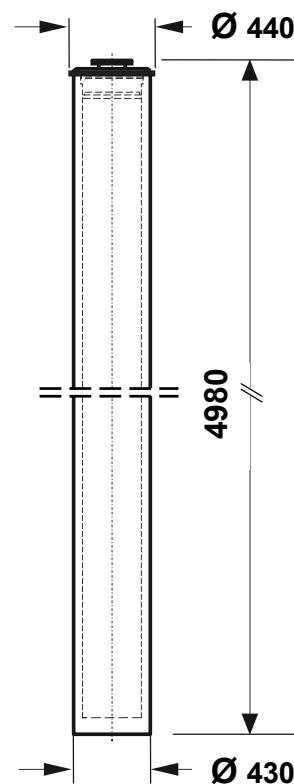


Abbildung 4-3: Brennstabkokille (BSK-3)

Es wird eine einzulagernde Abfallmenge von 4778 HAW-Kokillen und 5423 BSK3-Uran90%-MOX10%-Kokillen gemäß einer Schätzung des Abfallaufkommens angesetzt (FILBERT 2004a).

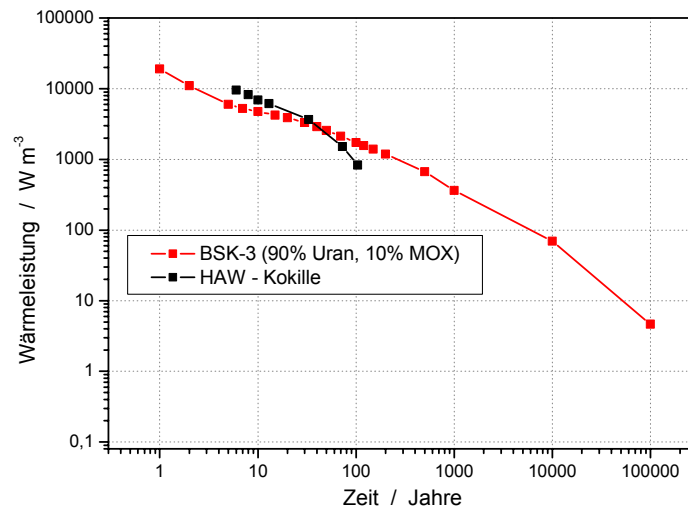


Abbildung 4-4: Wärmeleistung der Behälter

Bei der Bohrlochlagerung wird hier nach zwei verschiedenen Einlagerungsvarianten unterschieden. **Variante A** geht von einer Ummantelung des Behälters mit 30 cm Bentonit aus. **Variante B** wurde für die Uran90%-MOX10%-Kokillen entwickelt und beinhaltet zusätzlich eine wärmeverteilende Schicht (heat spreader, z.B. Sand) von 20 cm Stärke (Abbildung 4-5).

Der Bohrllochdurchmesser beträgt für die Variante A 103 cm (HAW-Kokille und Uran90%-MOX10%). Für die Bohrlochlagerung nach Variante B (nur Uran90%-MOX10%-Kokille) wird aufgrund der zusätzlichen wärmeverteilenden Schicht ein deutlich größerer Durchmesser von 143 cm benötigt.

Beim Konzept der Bohrlochlagerung gilt es, eine Auslegungstemperatur von 100 °C im Bentonit als technische Barriere sowie im Wirtsgestein einzuhalten, um deren Integrität zu gewährleisten.

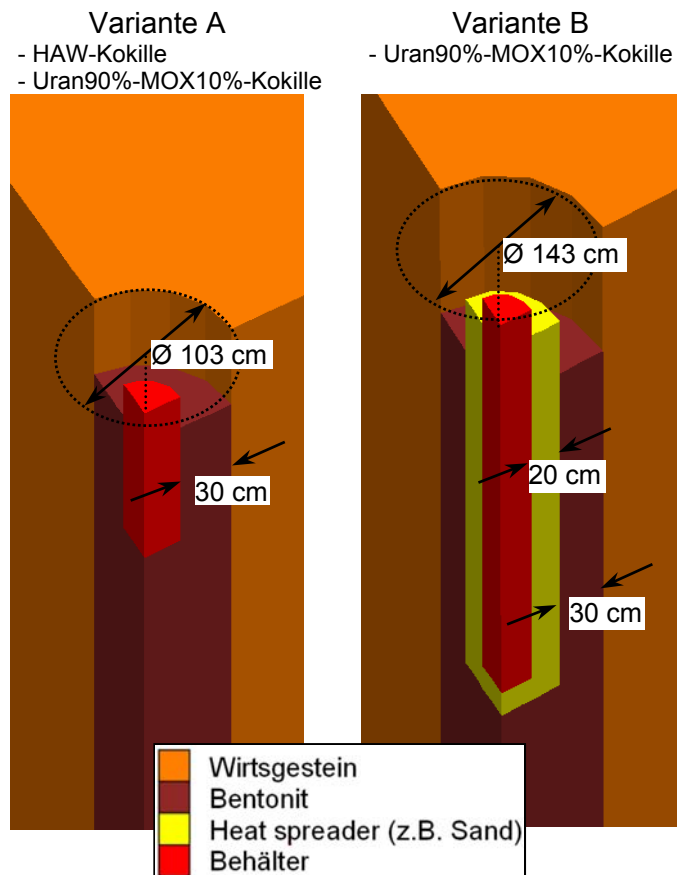


Abbildung 4-5: Varianten der Bohrlochlagerung

## 4.2 Streckenlagerung

Beim Konzept der Streckenlagerung werden die Endlagerbehälter direkt in der Strecke gelagert. Im Gegensatz zur Bohrlochlagerung befinden sich hier alle Behälter in einer Einlagerungsebene. Die Größe des gesamten Endlagerfeldes wird durch Behälterabstände und Streckenabstände bestimmt.

Es wird nur der Endlagerbehälter POLLUX-3 betrachtet. Er wurde zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus DWR-Brennelementen entworfen.

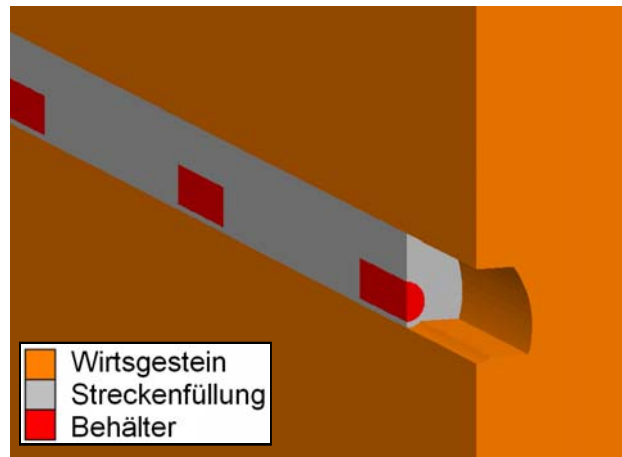


Abbildung 4-6: Schema der Streckenlagerung

### Behältertypen und Wärmeleistung

In Abbildung 4-7 wird exemplarisch der POLLUX-10- Behälter dargestellt, der zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus 10 DWR-Brennelementen (Inventar: 5,4 t SM) geeignet ist. In den folgenden Untersuchungen werden ähnlich aufgebaute Endlagerbehälter mit einer – gegenüber dem POLLUX-10 – reduzierten Beladung untersucht. Betrachtet werden der POLLUX-3 Behälter mit einem Inventar von 1,6 t SM und einem Durchmesser von 1,2 m.

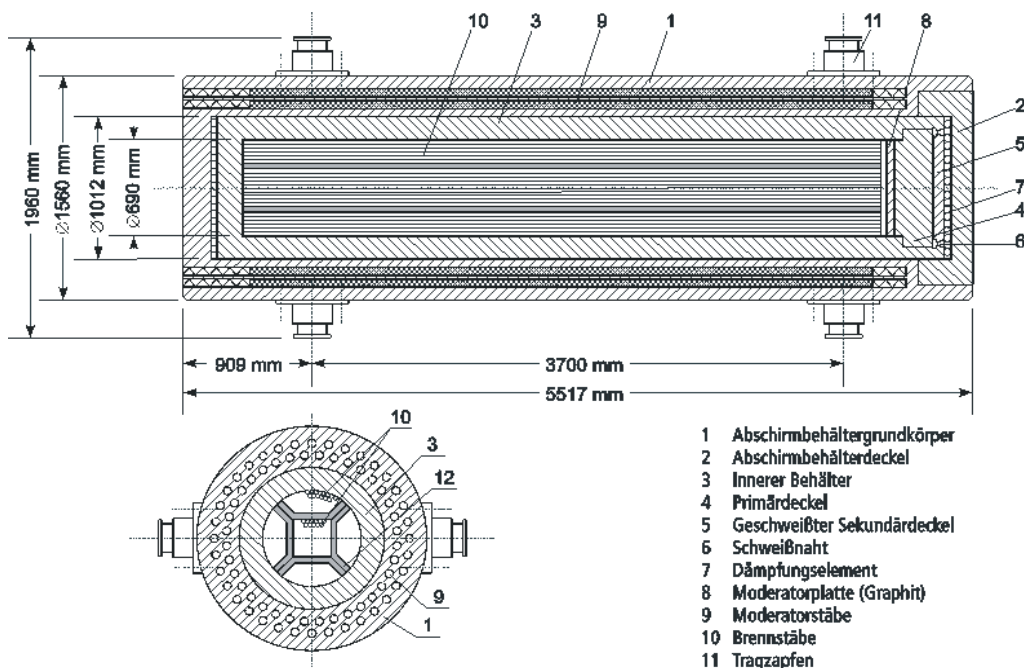


Abbildung 4-7: POLLUX-10-DWR-U-BE Endlagerbehälter

Im Konzept der Streckenlagerung von POLLUX-3- Behältern werden die Einlagerungsstrecken mit einer Höhe von ca. 4,6 m und einer Breite von 5,4 m bei hufeisenförmigem Streckenprofil angenommen. Der Endlagerbehälter wird von einer 20 cm mächtigen Sandschicht und einer 30 cm mächtigen Abdichtung aus Bentonit (beispielsweise Bentonit-Formsteine) allseitig umschlossen, welche als geotechnische Barriere fungieren. Der Resthohlraum in der Strecke wird mit Versatzbaustoff verfüllt.

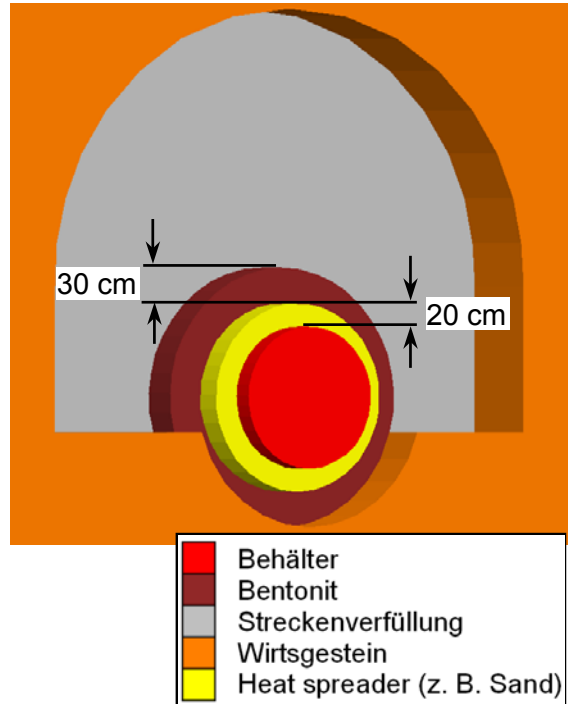


Abbildung 4-8: Schema der Streckenlagerung

Die Wärmeleistung des POLLUX-3- Behälters wird entsprechend der Abbildung 4-9 angenommen.

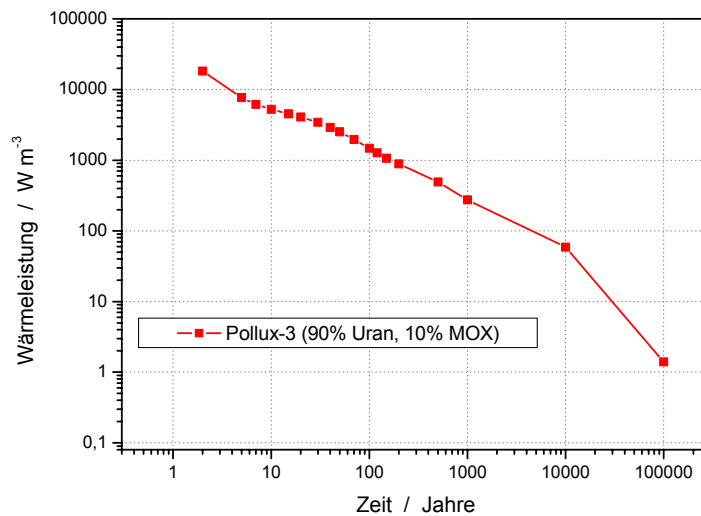


Abbildung 4-9: Wärmeleistung des POLLUX-3- Behälters

## 5 THERMISCHE AUSLEGUNGSBERECHNUNGEN

### 5.1 Einleitung und Grundlagen

Für eine Abschätzung der Wärmeentwicklung in den Bereichen um die verschiedenen Einlagerungsbehälter sind thermische Auslegungsberechnungen notwendig. Als Kriterium für die thermischen Auslegungsberechnungen wird festgelegt, dass die Temperatur im Bentonit an keiner Stelle die Grenztemperatur von 100 °C überschreiten darf. Dies gilt für alle in dieser Arbeit beschriebenen Einlagerungskonzepte. Die Auslegungstemperatur wurde mit 100 °C gewählt, da bis zu dieser Temperatur der Bentonit seine einschlusswirksame Funktion besitzt. Neben einer möglichen Wasserdampffreisetzung können oberhalb dieser Temperatur ungewollte chemische Veränderungen im Material auftreten. Die Unsicherheiten in Bezug auf die einschlusswirksame Funktion des Bentonits steigen ab 100 °C stark an (BEL und BERNIER 2006).

Die thermischen Auslegungsberechnungen sind entsprechend der Einlagerungskonzepte in Streckenlagerung und Bohrlochlagerung gegliedert und wurden für vier verschiedene generische Modellregionen durchgeführt (siehe Kapitel 3).

Für die thermische Auslegung eines Endlagers unter gegebenen Standortbedingungen ist die Kenntnis der thermophysikalischen Gesteinsparameter erforderlich. Auslegungsrelevant in diesem Zusammenhang sind die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Dichte des Wirtsgesteins (Abbildung 5-1).

3D instationäre Wärmetransportgleichung

$$\frac{\partial(\rho c)_e T}{\partial t} = \underbrace{\nabla \cdot \lambda_e \nabla T}_{\text{konduktiver Transport}} - \underbrace{v(\rho c)_f \nabla T}_{\text{advektiver Transport}} + \underbrace{H}_{\text{Wärme-}} \underbrace{\quad}_{\text{produktion}}$$

Auslegungs-relevant

T = Temperatur / K  
 ρ = Dichte / kg m<sup>-3</sup>  
 c = spezifische Wärmekapazität / J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>  
 λ = Wärmeleitfähigkeit / W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>  
 v = Filtergeschwindigkeit / m s<sup>-1</sup>  
 H = Wärmeproduktionsrate / μW m<sup>-3</sup>  
 ∇ = Nabla Operator (∂/∂x, ∂/∂y, ∂/∂z)  
 Indices:  
 f = bezogen auf Fluid  
 e = bezogen auf effektives Matrix-Fluid System

Abbildung 5-1: Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen

Grundlage für thermische Auslegungsberechnungen ist die in Abbildung 5-1 dargestellte dreidimensionale Wärmetransportgleichung für ein poröses Medium, die sich prinzipiell in drei Faktoren aufteilen lässt:

- dem konduktiven Wärmetransport,
- dem advektiven Wärmetransport und
- der radiogenen Wärmeproduktion.



Letztere ist in ihrer Wärmeleistung derart gering, dass sie für die thermische Auslegung keine Rolle spielt. Der advective Wärmetransport ist innerhalb der geplanten technischen Barriere Bentonit sowie innerhalb des Wirtsgesteins ebenfalls ohne Bedeutung, da auf Grund der geringen Permeabilität des Materials ein Energietransport durch Fluidbewegung extrem langsam erfolgt. Der konduktive Wärmetransport ist der bedeutende Faktor im Rahmen der thermischen Auslegung. Die in Abbildung 5-1 aufgezeigten Parameter spielen daher die entscheidende Rolle für die Temperaturentwicklung innerhalb der technischen Barriere und ihre genaue Kenntnis ist von großer Bedeutung. Eine Abschätzung, inwieweit der advective Energietransport tatsächlich zu vernachlässigen ist, kann durch Betrachtung der Pécletzahl erfolgen.

Nimmt man über ein Tiefenintervall der Länge  $L=z_1-z_0$  eine konstante eindimensionale Strömung an, kann aus der in Abbildung 5-1 gezeigten Gleichung folgende stationäre Wärme-transportgleichung für dieses System formuliert werden (BREDEHOEFT & PAPADOPULOS, 1965):

$$0 = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - (\rho \cdot c)_f v \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5-1)$$

Normiert man die Temperatur durch  $\Delta T = T_1 - T_0$ , erhält man eine vereinfachte Bilanzgleichung in den dimensionslosen Variablen  $\Theta = (T - T_0) / (T_1 - T_0)$  und  $\xi = z/L$ :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = Pe \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \quad (5-2)$$

mit der Pécletzahl  $Pe$ . Hierbei handelt es sich um eine dimensionslose Zahl, mit deren Hilfe man das Verhältnis zwischen dem Wärmetransport durch Advektion und dem durch Wärmeleitung angeben kann (JOBMANN & CLAUSER, 1994).

$$Pe = \frac{(\rho \cdot c)_f v L}{\lambda} = \frac{(\rho \cdot c)_f v \Delta T}{\lambda (\Delta T / L)} = \frac{Q_{adv}}{Q_{con}} \quad (5-3)$$

Welcher Transportmechanismus dominiert, kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$Pe < 1$ :           überwiegend konduktiv  
 $Pe > 1$ :           überwiegend advektiv

Setzt man typische Werte für ein Endlagersystem im Tonstein ein, so ergibt sich mit  $\rho_f = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $c_f = 4160 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $v = 8 \cdot 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ ,  $L = 50 \text{ m}$  (Abstand Einlagerungsbohrlöcher),  $\lambda = 1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 80 \text{ K}$  (zwischen benachbarten Bohrlöchern) unter Vernachlässigung des natürlichen vertikalen Wärmestromes, der im Vergleich zu dem erzeugten horizontalen Wärmestrom sehr klein ist:

$$Pe = 1,1 \cdot 10^{-4}$$

Bedenkt man, dass sowohl die Darcy-Geschwindigkeit  $v$  als auch die Temperaturdifferenz zwischen benachbarten Bohrlöchern konservativ gewählt sind, wird klar, dass der Wärmetransport durch Wärmeleitung bei weitem dominiert und damit auslegungsführend ist.

Die thermischen Auslegungsberechnungen wurden mit dem Programm FLAC<sup>3D</sup> (ITASCA 2005) durchgeführt. Es arbeitete nach dem Finite Differenzen Verfahren und kann mit explizitem und implizitem Algorithmus arbeiten. Nach dem Energieerhaltungssatz ergibt sich:

$$-q_i^t + q_v^t = \rho \cdot c_v \frac{\partial T}{\partial t} \tag{5-4}$$

mit

- $q_i^t$  Wärmestrom [ $W / m^2$ ]
- $q_v^t$  Wärmequelle [ $W / m^3$ ]
- $\rho$  Dichte [ $kg / m^3$ ]
- $c_v$  Spezifische Wärmekapazität [ $J / kg \cdot K$ ]
- $T$  Temperatur [ $^{\circ}C$ ]
- $t$  Zeit [s]
- Index t = thermal; Index i = 3 Komponenten des Vektors , i = 1,3

Folgende Abhängigkeit besteht zwischen Wärmestrom und Temperaturgradient für isotrope Bedingungen (Wärmeleitung):

$$q_i = -\lambda \cdot T_{,i} \tag{5-5}$$

mit

- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [ $W / m \cdot K$ ]
- $T_{,i}$  Temperaturgradient [ $K / m$ ]

Neben den thermischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und den Umgebungsbedingungen (siehe Kapitel 3) sind ebenfalls die thermischen Parameter der eingebrachten technischen Materialien entscheidend für die Wärmeausbreitung. Folgender Parametersatz wurde verwendet (SCHONEBECK et al. 2004, UHLIG et al. 2006):

**Tabelle 5-1: Überblick zu den thermischen Parametern der technischen Materialien**

	Streckenverfüllung	Bentonit		heat spreader	Behältertypen		
		graphitisiert	rein		POLLUX-3	HAW	BSK-3
<b>Dichte <math>\rho</math></b> [ $kg/m^3$ ]	1600	2000	2000	2000	7700	2750	7700
<b>Wärmeleitfähigkeit</b> [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	1,25	2,45	0,98	0,75	10,0	1,15	16,2
<b>Spezif. Wärmekapazität <math>c_p</math></b> [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]	1200	1200	1308	100	450	852	450

Die thermischen Parameter der Wirtsgesteine und weiterer Gesteinsschichten sind im Anhang (Tabelle A-7 bis A-10) dargestellt. Diese wurden anhand von in situ Messwerten (NAGRA 2001), Laborergebnissen (BUNTEBARTH 2005) und theoretischen Herleitungen über den Mineralgehalt (UHLIG et a. 2006) gebildet. Aufgrund fehlender Datengrundlage zu den thermischen Parametern des Wirtsgesteins im Modellgebiet Nord-2 wurde eine Min-Max-Abschätzung durchgeführt. Auf Grundlage der thermischen Parameter der geologischen Schichten und technischen Barrieren, der thermischen Randbedingungen und der Wärmeleistung der Behälter wurden die thermischen Auslegungsberechnungen durchgeführt.

Alle in den Berechnungen berücksichtigten Behälter werden entsprechend ihren Abmessungen als Volumenquelle mit gleichmäßiger Wärmeleistung modelliert. Eine Annahme über eine Verteilung des radioaktiven Materials innerhalb des Behälters wird nicht getroffen. Dieser Ansatz ist gerechtfertigt, da die Wärmeleitfähigkeit aller Behälter deutlich größer ist als die der umgebenden Materialien und des Wirtsgesteins.

## 5.2 Bohrlochlagerung

Die Bohrlochlagerung beinhaltet die Endlagerung von HAW-Kokillen bzw. BSK-3- Kokillen in 50 m tiefe, vertikale Bohrlöcher. Die Berechnung des Raumbedarfs eines Endlagers nach dem Bohrlochlagerungskonzept erfolgt in drei Schritten:

1. Berechnung der notwendigen Zwischenlagerzeit
2. Ermittlung des erforderlichen Behälterabstandes im Bohrloch mit der in Schritt 1 berechneten Zwischenlagerzeit
3. Bestimmung des Bohrlochabstandes, wobei die Zwischenlagerzeit aus dem ersten Berechnungsschritt und der Behälterabstand aus dem zweiten Schritt als Eingangswerte dienen.

Das numerische Modell zur Bohrlochlagerung beinhaltet einen Ausschnitt des Einlagerungsfeldes mit zwei Viertel-Bohrungen (Abbildung 5-2). Aufgrund der adiabaten Randbedingungen wird ein unendlich ausgedehntes, hexagonales Endlagerfeld nachgebildet.

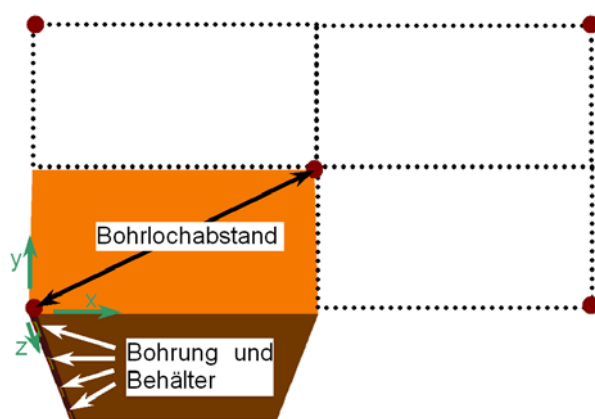


Abbildung 5-2: Modell des Einlagerungsfeldes, Bohrlochlagerung

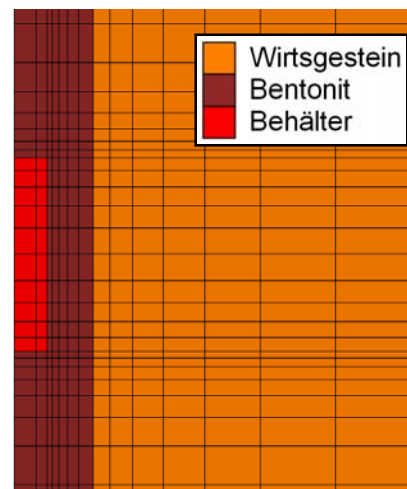


Abbildung 5-3: Diskretisierung im Behälterbereich

Die thermische Auslegung des Konzeptes Bohrlochlagerung wird detailliert exemplarisch am Beispiel des generischen Endlagergebiets Nord-1 gezeigt. Für die weiteren generischen Modellregionen erfolgt eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.

Es wurden zwei verschiedene Arten von Bentonit betrachtet:

1. reiner Bentonit ( $rB$ )
2. graphitisierter Bentonit ( $gB$ )

Der graphitierte Bentonit bietet aufgrund seiner erhöhten Wärmeleitfähigkeit (siehe Tabelle 5-1) deutliche Vorteile für die thermische Auslegung des Endlagers.

### 5.2.1 Bohrlochlagerung – Modell Nord-1

#### Ermittlung der notwendigen Zwischenlagerzeit

Abbildung 5-4 zeigt die notwendigen Zwischenlagerzeiten für die HAW-Kokillen und die Uran90%-MOX10%-Kokillen im generischen Referenzmodellgebiet Nord-1. Die dargestellten

Temperaturen entsprechen den berechneten Maximaltemperaturen am Übergang Behälter/Bentonit bzw. heat spreader/Bentonit Für die HAW-Kokillen sind in Variante *rB* 44 Jahre und in Variante *gB* 21 Jahre Zwischenlagerzeit notwendig. Die leistungsintensivere Uran90%-MOX10%-Kokille benötigt in Variante *gB* mit 20 cm heat spreader 25 Jahre und in Variante *rB* mit 20 cm heat spreader 42 Jahre Zwischenlagerzeit. Wird die Uran90%-MOX10%-Kokille nur von graphitisiertem Bentonit umgeben sind 39 Jahre Zwischenlagerzeit notwendig.

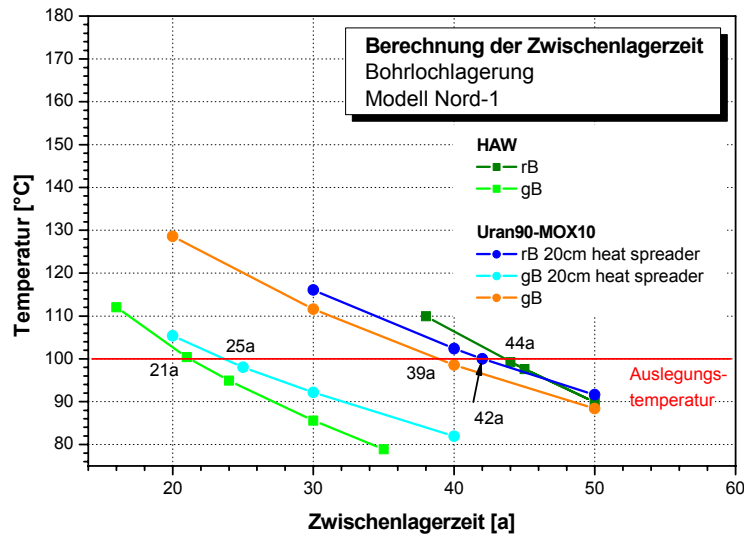


Abbildung 5-4: Notwendige Zwischenlagerzeiten für das generische Referenzmodellgebiet Nord-1

**Ermittlung des notwendigen Behälterabstands**

Auf Grundlage der ermittelten Zwischenlagerzeiten werden die notwendigen Behälterabstände (Behälterrand bis Behälterrand) bestimmt. Um sinnvolle Behälterabstände auch bei thermischer Überlagerung mehrerer Behälter bzw. Wärmequellen zu erhalten wurden die Zwischenlagerzeiten für die Uran90%-MOX10%-Kokille erhöht.

Tabelle 5-2: Veränderung der Zwischenlagerzeiten

Uran90%-MOX10%-Kokille	alte Zwischenlagerzeit	veränderte Zwischenlagerzeit
<i>rB</i> heat spreader 20cm	42	44
<i>gB</i> heat spreader 20 cm	25	27
<i>gB</i>	39	45

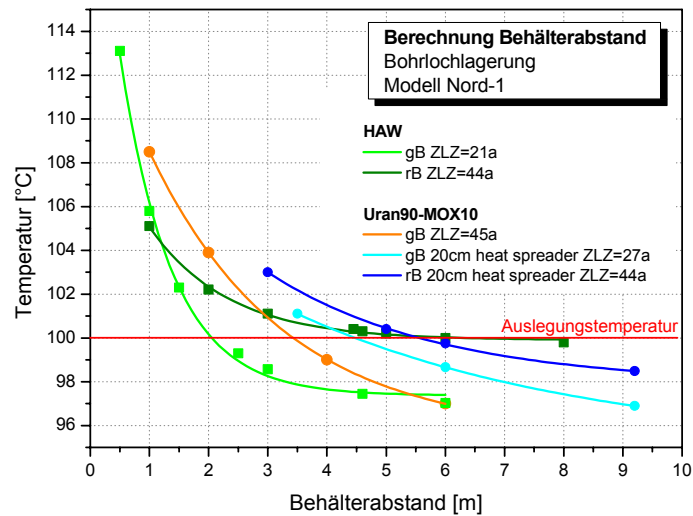


Abbildung 5-5: Notwendige Behälterabstände für das generische Referenzmodellgebiet Nord-1

**Ermittlung des notwendigen Bohrlochabstands**

Mit den Ergebnissen der Berechnungsphasen 1 und 2 werden die notwendigen Bohrlochabstände bestimmt. Die Überlagerung der einzelnen Temperaturfelder erzwingt eine weitere Erhöhung einzelner Zwischenlagerzeiten, um die Auslegungstemperatur innerhalb sinnvoller Bohrlochabstände erreichen zu können. Die große Veränderung der Zwischenlagerzeit in Variante *HAW-gB* wurde aufgrund der sehr kleinen Behälterabstände nach Abbildung 5-5 notwendig.

Tabelle 5-3: Veränderung der Zwischenlagerzeiten, Referenzmodellgebiet Nord-1

Variante	alte Zwischenlagerzeit	veränderte Zwischenlagerzeit
<i>HAW-gB</i>	21	27
<i>HAW-rB</i>	44	45
<i>Uran90%-MOX10%-gB-20cm heat spreader</i>	27	30
<i>Uran90%-MOX10%-rB-20cm heat spreader</i>	44	47

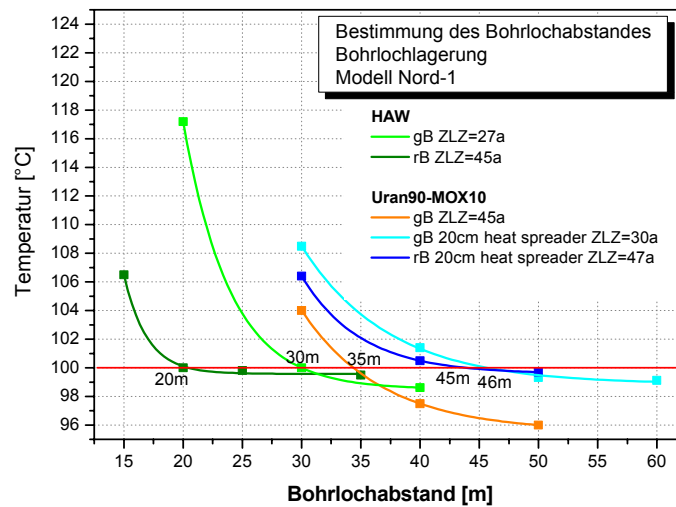


Abbildung 5-6: Notwendige Bohrlochabstände, Referenzmodellgebiet Nord-1

**Zusammenfassung Bohrlochlagerung Modell Nord-1**

Einen Überblick über die Ergebnisse der thermischen Auslegung für eine Bohrlochlagerung zeigt Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte

Variante		Zwischenlagerzeit [a]	Behälter pro Bohrloch	Bohrlochabstand [m]
HAW	rB	45	7	20
	gB	27	13	30
Uran90%-MOX10%	rB 20cm heat spreader	47	5	45
	gB 20cm heat spreader	30	5	46
	gB	45	5	35

Bei Annahme einer einzulagernden Menge von 4778 HAW-Kokillen ergibt sich für die Variante *HAW-rB* 0,24 km<sup>2</sup> und für die Variante *HAW-gB* 0,29 km<sup>2</sup> Flächenbedarf. Die Uran90%-MOX10%-Kokille hat einen erheblich größeren Flächenbedarf. Wird die Uran90%-MOX10%-Kokille von 20 cm heat spreader umgeben, so ist ein Flächenbedarf des Endlagers von ca. 2 km<sup>2</sup> (Variante *gB 20cm heat spreader* und *rB 20cm heat spreader*) notwendig. Bei Einlagerung der Kokille ohne heat spreader und graphitisiertem Bentonit sind ca. 1,2 km<sup>2</sup> Fläche notwendig.

**5.2.2 Berechnungsergebnisse der Bohrlochlagerung (4 Modellgebiete)**

Tabelle 5-5 zeigt eine Zusammenfassung der thermischen Auslegungsberechnungen zur Bohrlochlagerung für die vier betrachteten Modellgebiete. Die notwendigen Zwischenlagerzeiten variieren für die Variante *HAW-rB* zwischen 45 und 67 Jahren und für *HAW-gB* zwischen 24 und 47 Jahren. Für die leistungsintensivere Uran90%-MOX10%-Kokille sind längere Zwischenlagerzeiten notwendig. Diese Kokille in der Berechnungsvariante *rB-20cm heat spreader* benötigt zwischen 46 und 73 Jahren Zwischenlagerzeit. Für die Variante *gB-20cm heat spreader* sind zwischen 27 und 72 Jahren Zwischenlagerzeit notwendig. Einige Varianten wurden aufgrund der zu langen erforderlichen Zwischenlagerzeit nicht betrachtet. Für das Modellgebiet Nord-2 wurde aufgrund ungenügend vorliegender thermischer Parame-

ter im Untersuchungsgebiet eine Abschätzung mit einer minimalen und einer maximalen Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{\min} / \lambda_{\max}$ ) der Einlagerungsschicht durchgeführt.

**Tabelle 5-5: Ergebnisse der thermischen Berechnungen zur Bohrlochlagerung, 4 Modellgebiete**

Bohrlochlagerung Modellgebiet Süd-1	HAW-Kokille		BSK3-Uran90%-MOX10%			
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit	rB 20cm heat spreader	gB 20cm heat spreader	rB	gB
Zwischenlagerzeit [Jahre]	61	38	73	53		
Behälter pro Bohrloch	9	6	3	3		
Bohrlochabstand [m]	30	30	50	50		
Anzahl benötigter Bohrlöcher	531	797	1808	1808		
Größe des Einlagerungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	0,42	0,63	3,92	3,92		

Bohrlochlagerung Modellgebiet Süd-2	HAW-Kokille		BSK3-Uran90%-MOX10%			
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit	rB 20cm heat spreader	gB 20cm heat spreader	rB	gB
Zwischenlagerzeit [Jahre]	48	24	46	27		44
Behälter pro Bohrloch	10	7	4	4		4
Bohrlochabstand [m]	29	28	42	44		39
Anzahl benötigter Bohrlöcher	478	683	1356	1356		1356
Größe des Einlagerungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	0,35	0,47	2,08	2,28		1,79

Bohrlochlagerung Modellgebiet Nord-1	HAW-Kokille		BSK3-Uran90%-MOX10%			
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit	rB 20cm heat spreader	gB 20cm heat spreader	rB	gB
Zwischenlagerzeit [Jahre]	45	27	47	30	75	45
Behälter pro Bohrloch	7	13	5	5	5	5
Bohrlochabstand [m]	20	30	45	46	28	35
Anzahl benötigter Bohrlöcher	683	368	1085	1085	1085	1085
Größe des Einlagerungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	0,24	0,29	1,91	1,99	0,74	1,16

Bohrlochlagerung Modellgebiet Nord-2 $\lambda_{\min} / \lambda_{\max}$	HAW-Kokille		BSK3-Uran90%-MOX10%			
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit	rB 20cm heat spreader	gB 20cm heat spreader	rB	gB
Zwischenlagerzeit [Jahre]	67 / 60	47 / 36		72 / 48		
Behälter pro Bohrloch	10 / 10	9 / 8		5 / 4		
Bohrlochabstand [m]	25 / 26	28 / 29		47 / 38		
Anzahl benötigter Bohrlöcher	478 / 478	531 / 598		1085 / 1356		
Größe des Einlagerungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	0,26 / 0,28	0,37 / 0,44		2,1 / 1,7		

### 5.3 Streckenlagerung

Das Konzept der Streckenlagerung betrachtet die Endlagerung von POLLUX-3- Behältern in Strecken und eine Ummantelung der Behälter mit einem heat spreader (wärmeverteilende Schicht, 20 cm, beispielsweise Sand) und einer Bentonitschicht (30 cm) nach Abbildung 4-8. Unter dieser Bedingung wird in drei Schritten der Raumbedarf (siehe Abbildung 5-7) eines Endlagers bestimmt.

1. Berechnung der notwendigen Zwischenlagerzeit
2. Ermittlung des erforderlichen Behälterabstandes mit der in Schritt 1 berechneten Zwischenlagerzeit
3. Bestimmung des Streckenabstandes, wobei die Zwischenlagerzeit aus dem ersten Berechnungsschritt und der Behälterabstand aus dem zweiten Schritt als Eingangswerte dienen.

Kriterium der thermischen Auslegung ist, dass im Bentonit, der als 30 cm starkes geotechnisches Barrierematerial den Endlagerbehälter und heat spreader allseitig umgibt, eine Auslegungstemperatur von 100 °C nicht überschritten werden soll, um die Integrität der Abdichtung zu gewährleisten (Abbildung 4-8, S. 23). Aufgrund des Wärmetransports in dem Bereich tritt die höchste Temperatur im Bentonit stets an der Oberkante des heat spreader auf.

Das numerische Modell beinhaltet einen Ausschnitt des Einlagerungsfeldes mit dem Einlagerungsbehälter. Aufgrund der adiabaten Randbedingungen wird ein unendlich ausgedehntes Einlagerungsfeld nachgebildet mit den Einzelgeometrien nach Abbildung 5-7. Die Diskretisierung der Behälterumgebung zeigt Abbildung 5-8.

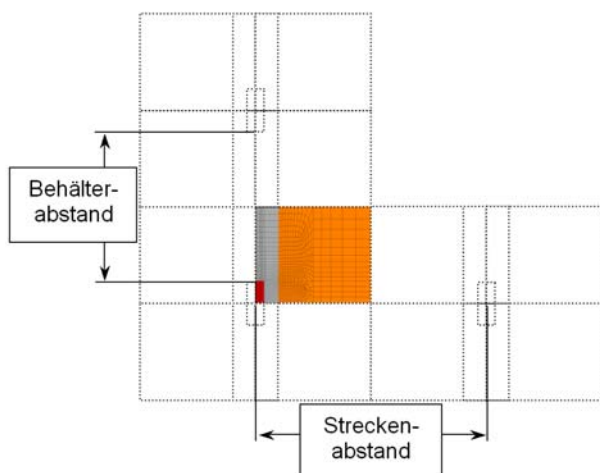


Abbildung 5-7: Modell des Einlagerungsfeldes bei Streckenlagerung

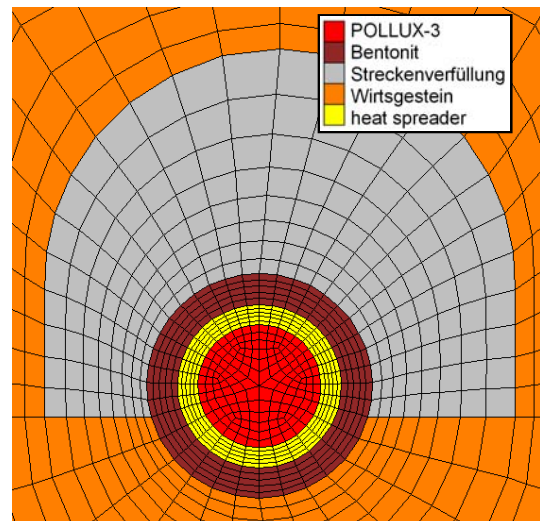


Abbildung 5-8: Diskretisierung der Behälterumgebung

Die thermische Auslegung der Streckenlagerung wird detailliert exemplarisch am Beispiel des generischen Endlagergebiets Nord-1 gezeigt. Für die weiteren generischen Modellregionen erfolgt eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.

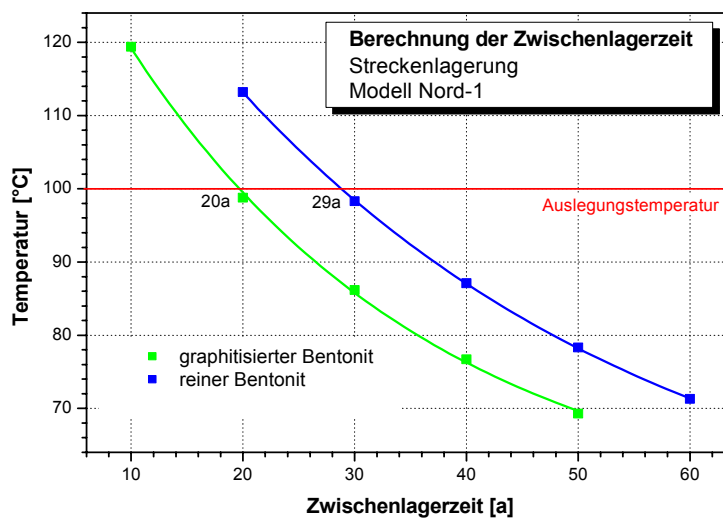


### 5.3.1 Streckenlagerung – Modell Nord-1

#### Ermittlung der notwendigen Zwischenlagerzeit

In der ersten Untersuchungsphase erfolgte die Ermittlung der minimalen Zwischenlagerzeit. Die Untersuchungen wurden an einem numerischen Modell mit ausreichender Größe (Behälterabstand und Streckenabstand jeweils 100 m) durchgeführt, um Randeffekte auszuschließen.

In Abbildung 5-9 sind für unterschiedliche Zwischenlagerzeiten die für die untersuchten Varianten reiner Bentonit (*rB*) und graphitisierter Bentonit (*gB*) erreichten Maximaltemperaturen aufgetragen. Die Untersuchungen zeigen, dass für die Variante *rB* die Auslegungstemperatur von 100 °C bei einer Zwischenlagerzeit von ca. 29 a nicht mehr überschritten wird. Für die Variante *gB* wird die Auslegungstemperatur für Zwischenlagerzeiten von ca. 20 a unterschritten.



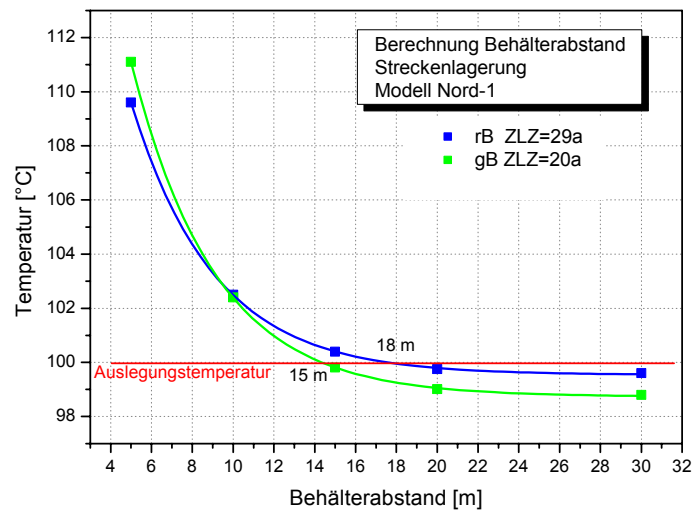
**Abbildung 5-9: Maximaltemperatur im Bentonit als Funktion der Zwischenlagerzeit für die Varianten reiner Bentonit und graphitisierter Bentonit**

Die weiteren Berechnungen zur Bestimmung der geometrischen Parameter erfolgten daher für die Variante *rB* unter Ansatz einer Zwischenlagerzeit von 29 a und für die Variante *gB* unter Ansatz einer Zwischenlagerzeit von 20 a.

#### Ermittlung des notwendigen Behälterabstands

In der zweiten Untersuchungsphase wurden die Behälterabstände innerhalb der Strecke variiert. Die Berechnungen erfolgten an einem numerischen Modell mit ausreichendem Streckenabstand von 100 m, so dass die daraus erwachsenden Randeffekte zu vernachlässigen sind.

In der Variante *rB* zeigt sich für Behälterabstände größer als 18 m eine Unterschreitung der Auslegungstemperatur. In der Variante *gB* wird ab einem Behälterabstand größer als 15 m die Auslegungstemperatur unterschritten.



**Abbildung 5-10: Maximaltemperaturen im Bentonit in Abhängigkeit vom Behälterabstand d**

Die weiteren Berechnungen erfolgten für die Variante *rB* mit einem Behälterabstand von 18 m und für die Variante *gB* mit einem Behälterabstand von 15 m.

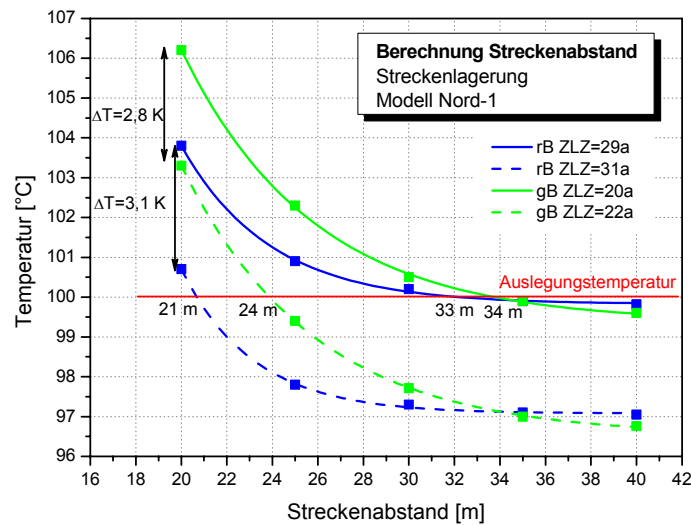
**Ermittlung des notwendigen Streckenabstands**

Auf Basis der in Tabelle 5-6 zusammengefassten vorherigen Untersuchungsergebnisse erfolgte in Phase 3 eine Variation des Streckenabstandes.

**Tabelle 5-6: Parametersatz zur Bestimmung des Streckenabstandes**

Variante	Zwischenlagerzeit	Behälterabstand
<i>rB</i>	29	18
<i>gB</i>	20	15

Die Ergebnisse zeigen bei geringer werdendem Streckenabstand eine exponentielle Zunahme der maximalen Temperatur. Durch die Überlagerung der Temperaturfelder eng benachbarter Einlagerungsstrecken kommt es zu einer Abnahme des Temperaturgradienten, und somit zu einer Behinderung der Wärmeausbreitung. Infolge dieses Wärmestaus steigt die Temperatur für geringer werdende Abstände der Einlagerungsstrecken überproportional an, Abbildung 5-11.



**Abbildung 5-11: Maximaltemperatur im Bentonit in Abhängigkeit vom Streckenabstand**

Für die Variante *rB* wird die Auslegungstemperatur ab einem Streckenabstand von 33 m unterschritten. Die Variante *gB* weist ähnliche notwendige Streckenabstände aus. Hier wurde die zulässige Auslegungstemperatur ab einem Streckenabstand von 34 m erreicht. Abbildung 5-11 zeigt zusätzlich die notwendigen Streckenabstände für beide Varianten mit einer geringfügig erhöhten Zwischenlagerzeit (+ 2 Jahre). Durch diese Maßnahme können die Streckenabstände um ca. 30 % verringert werden. Die Erhöhung der Zwischenlagerzeit um 2 Jahre reduziert die Temperatur im Bentonit um ca. 3 K.

**Zusammenfassung Streckenlagerung Modell Nord-1**

Einen Überblick über die Ergebnisse zeigt Tabelle 5-7. Hieraus ist ersichtlich, dass durch eine Graphitisierung der geotechnischen Barriere Bentonit die notwendige Zwischenlagerzeit um ca. 30 % verringert werden kann.

**Tabelle 5-7: Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte**

Variante	Zwischenlagerzeit [a]	Behälterabstand [m]	Streckenabstand [m]
<i>rB</i>	29	18	33
<i>gB</i>	20	15	34

Bei Annahme einer Einlagerungsstreckenlänge von 250 m sind für die Variante *rB* 543 Strecken mit einer Fläche des Einlagerungsfeldes von ca. 4,5 km<sup>2</sup> notwendig. Für die Variante *gB* sind im gleichen Fall 452 Strecken und ca. 3,8 km<sup>2</sup> Fläche notwendig.

**5.3.2 Berechnungsergebnisse der Streckenlagerung (4 Modellgebiete)**

In Tabelle 5-8 sind die Ergebnisse der thermischen Berechnungen zur Streckenlagerung dargestellt. Die notwendigen Zwischenlagerzeiten für den POLLUX-3- Behälter variieren bei Nutzung von reinem Bentonit zwischen 29 und 59 Jahren und bei Nutzung von graphitisier-tem Bentonit zwischen 20 und 48 Jahren. Insgesamt wird eine Fläche zwischen 3,6 und 8,7 km<sup>2</sup> notwendig für die betrachteten Varianten der Streckenlagerung.

**Tabelle 5-8: Ergebnisse der thermischen Berechnung zur Streckenlagerung, 4 Modellgebiete**

Streckenlagerung Modellgebiet Süd-1	POLLUX-3		Streckenlagerung Modellgebiet Süd-2	POLLUX-3	
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit		reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit
Zwischenlagerzeit [a]	46	31	Zwischenlagerzeit [a]	31	21
Behälterabstand [m]	9	26	Behälterabstand [m]	13	13
Streckenabstand [m]	60	45	Streckenabstand [m]	34	35
Anzahl benötigter Strecken (250 m)	319	775	Anzahl benötigter Strecken (250 m)	418	418
Größe des Einlage- rungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	4,8	8,7	Größe des Einlage- rungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	3,6	3,7

Streckenlagerung Modellgebiet Nord-1	POLLUX-3		Streckenlagerung Modellgebiet Nord-2 $\lambda_{\min} / \lambda_{\max}$	POLLUX-3	
	reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit		reiner Bentonit	graphitisierter Bentonit
Zwischenlagerzeit [a]	29	20	Zwischenlagerzeit [a]	59 / 47	48 / 33
Behälterabstand [m]	18	15	Behälterabstand [m]	15 / 11	15 / 18
Streckenabstand [m]	33	34	Streckenabstand [m]	41 / 42	40 / 40
Anzahl benötigter Strecken (250 m)	543	452	Anzahl benötigter Strecken (250 m)	452 / 362	452 / 543
Größe des Einlage- rungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	4,5	3,8	Größe des Einlage- rungsfeldes [km <sup>2</sup> ]	4,6 / 3,8	4,5 / 5,4

## 5.4 Vergleich von Bohrloch- und Streckenlagerung

Zwischen Bohrlochlagerung und Streckenlagerung bestehen große Unterschiede hinsichtlich der Wärmeausbreitung. Der Vorteil der Streckenlagerung hinsichtlich der Wärmeausbreitung ist die Größe des Einlagerungsbehälters POLLUX-3 gegenüber der BSK3-Kokille. Über die wesentlich größere Behälteroberfläche wird die Wärme besser abgeführt, was teilweise Unterschiede bis 40 % in der notwendigen Zwischenlagerzeit bewirkt. Die erforderliche Größe des Einlagerungsfeldes dagegen ist bei der Streckenlagerung größer, da hier im Gegensatz zur Bohrlochlagerung nur eine Ebene thermisch genutzt wird. Mit den verwendeten Zwischenlagerzeiten variiert die Größe des Einlagerungsfeldes bei Streckenlagerung von POLLUX-3 zwischen 3,6 und 8,7 km<sup>2</sup>. Werden bei der Bohrlochlagerung von BSK3-Uran90%-MOX10%-Kokillen die Varianten mit 20 cm heat spreader betrachtet, sind zwischen 1,9 und 3,9 km<sup>2</sup> Fläche für Einlagerungsfelder erforderlich. Bei Betrachtung des notwendigen Flächenbedarfs hat die Bohrlochlagerung deutliche Vorteile gegenüber der Streckenlagerung.

Die Einlagerung von HAW-Kokillen wurde nur für die Bohrlochlagerung untersucht. Mit der gegebenen Abfallmenge wird ein Platzbedarf zwischen 0,24 und 0,47 km<sup>2</sup> notwendig.

## 6 STABILITÄTSANALYSE DER EINLAGERUNGSSTRECKEN

### 6.1 Betrachtete Modellgebiete und Materialparameter

In diesem Kapitel werden die Einflüsse der Auffahrung von Strecken und des Wärmeeintrags auf den umgebenden Tonstein und einen möglichen Ausbau betrachtet. Dabei wird auf die Konzepte Streckenlagerung und Bohrlochlagerung der Referenzmodellgebiete Nord-1 und Süd-1 eingegangen. Diese beiden Modellgebiete unterscheiden sich deutlich in der Tiefenlage und decken damit das Spektrum möglicher Einlagerungshorizonte im Tonstein ab.

Das Wirtsgestein im Modellgebiet Süd-1 ist der Opalinuston, im Modellgebiet Nord-1 der Unterkreideton des Apt. Es wurden Materialparameter aus der Literatur für die Berechnungen genutzt. Direkte Daten aus den jeweiligen Untersuchungsgebieten waren nicht verfügbar. Deshalb sind die gewählten Materialparameter mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Der Wassergehalt eines Tonsteins beispielsweise hat enormen Einfluss auf dessen Festigkeits- und Steifigkeitsparameter. Die Unsicherheiten werden durch zusätzliche Betrachtung von verminderten Festigkeitsparametern in die Untersuchungen einbezogen.

#### Opalinuston im Modellgebiet Süd-1

Als Datenbasis zur Beschreibung des geomechanischen Verhaltens des Opalinustons dienten aufgrund der Ähnlichkeit der Geologie und des vorhandenen geomechanischen Datensatzes maßgeblich Ergebnisse an Proben der Sondierbohrung Benken (NAGRA 2001). Es wurde ein bilineares Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb verwendet (siehe Abbildung 6-1, Tabelle A-1). In diesem Stoffmodell ist die Mohr'sche Bruchkurve (bestimmt durch den Reibungswinkel  $\varphi$  und die Kohäsion  $c$ ) abhängig von der minimalen Hauptspannung und wird in zwei Bereiche (bilinear) unterteilt. Dieses bilineare Bruchkriterium wurde von der NAGRA (2002) für den Opalinuston in Benken entwickelt.

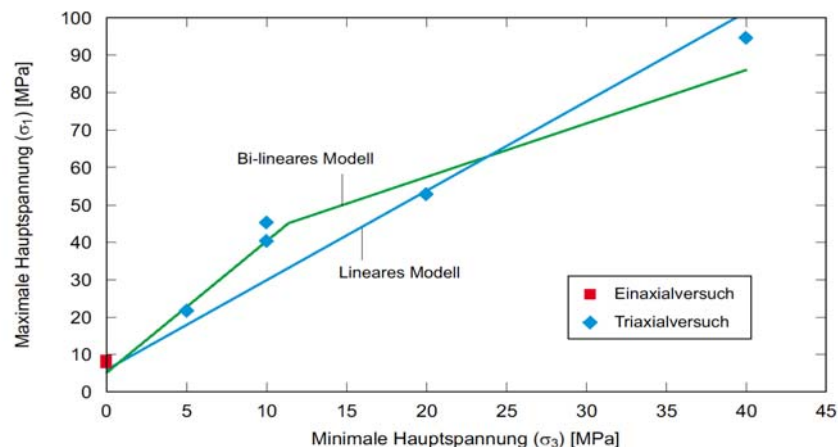


Abbildung 6-1: Modellkalibrierung mit den Labordaten (Benken) für die Festigkeit der Schichtung [NAGRA 2002]

Die Dilatanzeigenschaften des Opalinustons wurden analog zu UHLIG et al. (2006) in Abhängigkeit der Minimalspannung mit Werten zwischen  $1,5^\circ \leq \psi \leq 25^\circ$  gewählt. Es wurde ein ähnlicher Primärspannungszustand wie in Benken mit Seitendruckbeiwerten  $0,96 \leq \lambda \leq 1,34$  (kleinere Horizontalspannung entlang der Tunnelachse – geomechanisch ungünstiger Fall) angenommen. Es wird im Einlagerungsbereich des Referenzmodellgebiets Süd-1 von einem ähnlichen Wassergehalt wie in Benken ausgegangen. Es werden die Festigkeitsparameter nach NAGRA (2002) verwendet. Aufgrund der Gesteinseigenschaften von Tonstein wird

nach den Festigkeitsparametern der Gesteinsmatrix und den Festigkeitsparametern der Schichtung unterschieden. Es wurde eine horizontale Schichtung im Tonstein angenommen. Die Schichtung hat stets geringere Festigkeiten als die Matrix. Das verwendete Stoffmodell in FLAC 3D ist das Subiquitous Joint Modell (ITASCA 2005). Die bestimmenden Festigkeitsparameter ergeben sich aus der Richtung von Scherspannungen ( $\tau$ ) und Zugspannungen ( $\sigma_t$ ) in den Elementen des Modells. Bei Spannungsrichtungen zwischen den in Abbildung 6-2 dargestellten Richtungen wird der Spannungsvektor aufgeteilt in Schichtungsrichtung und senkrecht dazu.

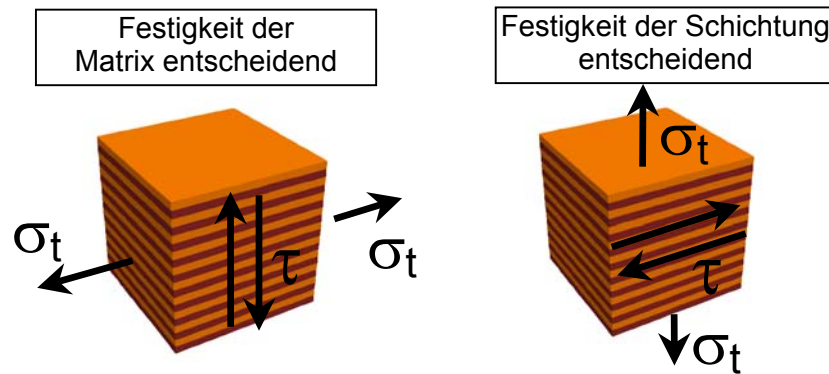


Abbildung 6-2: Prinzip des verwendeten Stoffmodells

Die verwendeten mechanischen und thermischen Eigenschaften sind im Anhang in Tabellenform dargestellt.

### Unterkreideton Apt im Modellgebiet Nord-1

Das Wirtsgestein (Apt) im generischen Referenzmodell Nord-1 ist ein Tonmergel (Anlagenband Geologie). Die Materialparameter wurden maßgeblich aus Untersuchungsergebnissen im Schacht Konrad ermittelt (siehe Abbildung 6-3).

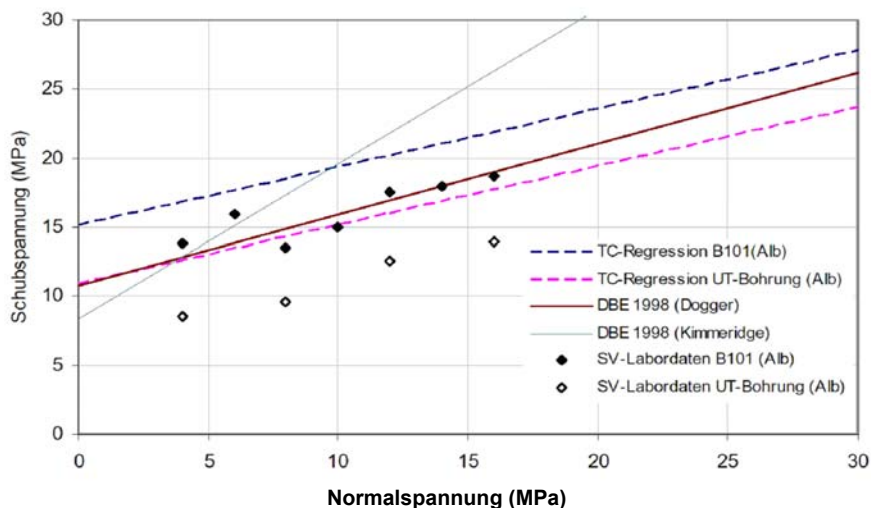


Abbildung 6-3: Ergebnisse an Tongestein in Konrad aus Versuchen im Rahmenschergerät mit Unterscheidung in von übertage bzw. von untertage gewonnenes Bohrkernmaterial und zugeordnete Scherfestigkeiten nach (DBE 1998), aus (LUX et al. 2005)

Der Elastizitätsmodul wird mit 4 GPa und die Poissonzahl mit 0,35 abgeschätzt (nach WITTKKE 1991). Die Bruchverzerrung (Übergang von Spitzenfestigkeit zu Restfestigkeit) beträgt für den Tonstein in Konrad ca. 1,5 % (LUX et al. 2005). Der Dilatanzwinkel beträgt 0°. Wassergehalt und Porosität werden nach den Bedingungen in Konrad (WITTKKE 1991) mit 7,5 % angenommen. Es wird ein isotroper Grundspannungszustand angenommen. Die verwendeten mechanischen und thermischen Parameter sind im Anhang aufgeführt.

Die Untersuchungen sollen zunächst nur die Simulation einer instantanen Auffahrung unter Berücksichtigung der Kurzzeitfestigkeit beinhalten. Zeitabhängige Deformationseigenschaften werden nur zur Bohrlochlagerung gesondert betrachtet.

### Mechanische Stoffgesetze

Die Grundlage für jedes verwendete Stoffgesetz bildet das Versagen nach Mohr-Coulomb. Im speziellen Fall des Subequivalent Joint Modells (vgl. Abbildung 6-2) wird dieser Versagensmechanismus für Gesteinsmatrix und –schichtung getrennt betrachtet. Das Scherversagen nach Mohr-Coulomb wird folgendermaßen beschrieben:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \cdot N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (6-1)$$

mit

$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$  Hauptspannungen

c Kohäsion

$$N_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

Für Zugversagen gilt:  $f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (6-2)$

mit

$\sigma^t$  Zugfestigkeit

Versagen tritt beispielsweise ein, wenn Spannungspunkte (beschrieben durch  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) die Festigkeitskurven in den Abbildungen 6-1 bzw. 6-3 überschreiten.

Zur Beurteilung des deviatorischen Spannungszustandes wird die Mises-Spannung (eine Vergleichsspannung) nach der Gestaltänderungshypothese verwendet mit:

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6-3)$$

## 6.2 Stabilitätsanalyse der Strecken bei Bohrlochlagerung

Das numerische Modell beinhaltet zwei Viertel-Bohrungen und zwei halbe Strecken (Abbildung 6-4). Als Ausbau wurde eine 30 cm Betonschale gewählt. Im Bereich der Sohle hat der Beton eine Stärke von 50 cm. Die Funktion des Ausbaus besteht in der Vermeidung von Auflockerung im Gebirge und der Gewährleistung der Arbeitssicherheit in den Strecken. Der Ausbau wird unmittelbar nach der Auffahrung gestellt. Der Betonschale werden zeitabhängige Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften zugewiesen. In Abbildung 6-5 ist der Verlauf des Elastizitätsmoduls und der Bruchfestigkeit der Betonschale über der Zeit dargestellt. Es handelt sich um eine Betonqualität B 50 mit einer 28-Tage-Festigkeit von 50 MPa und einem Elastizitätsmodul  $E_{28 \text{ Tage}} = 40,5 \text{ GPa}$ . Im Modell wird die Betonschale rein elastisch betrachtet und Druckspannungen über 50 MPa als Überbeanspruchung bewertet (Die Druckfestigkeit bei biaxialer Belastung ist nur geringfügig größer als diese bei einaxialer Belastung, in UHLIG et al 2006). Beide Strecken werden mit Abschlagslängen á 2 m aufgefahren (Auffahrung der linken Strecke vor der rechten Strecke). Ortsbrustsicherung wird im Modell während der Auffahrung durch einen Gegendruck von 3 bar simuliert. Die zweite Strecke wird erst nach Erreichen der 28-Tage-Druckfestigkeit des Betons in der ersten Strecke aufgefahren.

Die Abmessungen des Modells und die Behälteranzahl im Bohrloch entsprechen den Ergebnissen aus Kapitel 4 mit den Varianten *HAW-gB* (siehe Tabelle 6-1). Die Streckensohle im Modellgebiet Nord-1 befindet sich in 335 m Teufe und im Modellgebiet Süd-1 in 790 m Teufe.

Tabelle 6-1: In der Stabilitätsanalyse betrachtete Varianten zur Bohrlochlagerung

Variante	Zwischenlagerzeit [a]	Behälter pro Bohrloch	Bohrlochabstand [m]
Süd-1 HAW gB	38	6	30
Nord-1 HAW gB	27	13	30

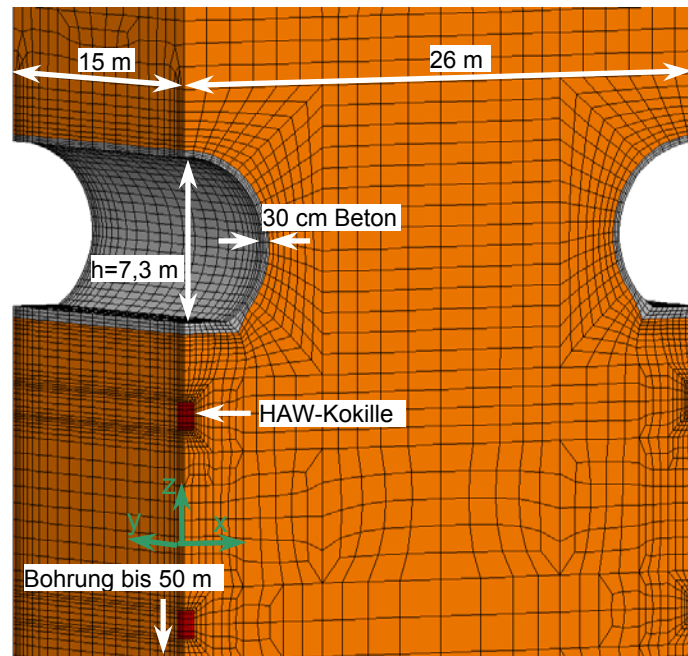


Abbildung 6-4: Modell zur Stabilitätsanalyse, Bohrlochlagerung

Für die Bewertung der Ausbaubelastung in den jeweiligen Modellgebieten wird folgendes betrachtet:

- Druckspannungen im Ausbau nach der Auffahrung
- Druckspannungen im Ausbau infolge der Wärmeentwicklung der Behälter
- Plastifizierung des umgebenden Gebirges
- Deviatorspannungen (nach Mises) im Gebirge
- Biegemomentverteilung und Zugspannungen im Ausbau

Die Simulationen berücksichtigen zunächst lediglich die instantane Reaktion des Gebirges. Da es infolge rheologischer Eigenschaften des Tonsteins zu einem Abbau der deviatorischen Spannungen im Gebirge kommt, ist bei Betrachtung längerer Zeiträume mit zusätzlichen Lasten auf den Ausbau zu rechnen

Die Ergebnisse dieser Stabilitätsanalyse sollten vergleichend für einen definierten Ausbauzustand und nicht absolut angesehen werden. Durch veränderte Rahmenbedingungen sind unterschiedliche Reaktionen von Gebirge und Ausbau zu erreichen. Durch Simulation ein und desselben Ausbaus ist es möglich die mechanischen Verhältnisse der verschiedenen Modellregionen vergleichend zu bewerten. Eine Bemessung eines angemessenen Ausbaus für die jeweiligen Referenzmodellgebiet ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht vorgesehen.



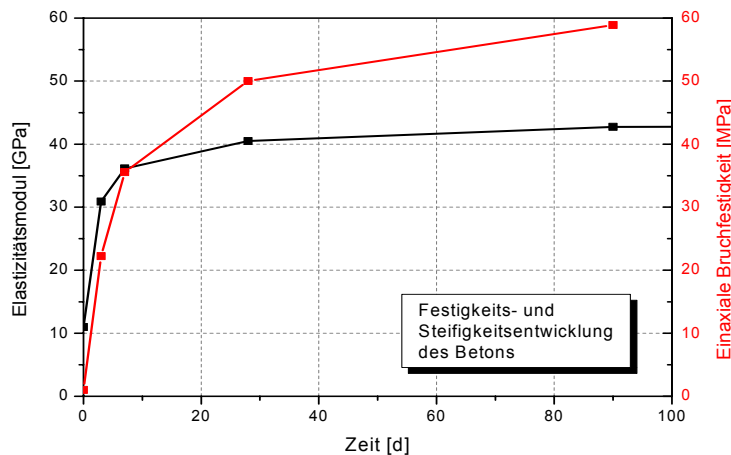


Abbildung 6-5: Annahmen hinsichtlich der Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung des Betons

### 6.2.1 Die Auffahrung der Strecken

Infolge der Auffahrung beider Strecken kommt es zur Umverteilung von Spannungen. Einige Bereiche um die Hohlräumkontur werden überbeansprucht (Plastifizierung) und die Lasten werden zum Teil vom Ausbau aufgenommen. Mit fortschreitender Auffahrung kommt es zu einer sukzessiven Erhöhung der Belastung im bestehenden Ausbau. Der Grundspannungszustand im Modellgebiet Süd-1 ist ca. 11,5 MPa höher als im Modellgebiet Nord-1. Die höheren Spannungen im Gebirge bewirken auch eine höhere Belastung des Ausbaus.

#### Tiefe der plastifizierten Zone

Die Abbildung 6-6 zeigt die Plastifizierung des Gebirges infolge der Auffahrung. Es sind nur die „linken„ Strecken dargestellt, da die Unterschiede zwischen „linker“ und „rechter“ Strecke hinsichtlich Gebirgsplastifizierung marginal sind. Die Tiefe der Plastifizierung im Sohlbereich des Modellgebiets Nord-1 beträgt ca. 0,8 – 1,0 m und im Firstbereich ca. 0,5 m. Am Stoß ist kaum eine Plastifizierung vorhanden (Die intervallweise Plastifizierung im Stoßbereich entsteht durch die Auffahrung in Abschlügen). Im Modellgebiet Süd-1 versagen Bereiche in Firste und Sohle bis 3,5 m (Betrachtung in der Modellmitte). Im Stoßbereich ist die Tiefe der plastifizierten Zone gering.

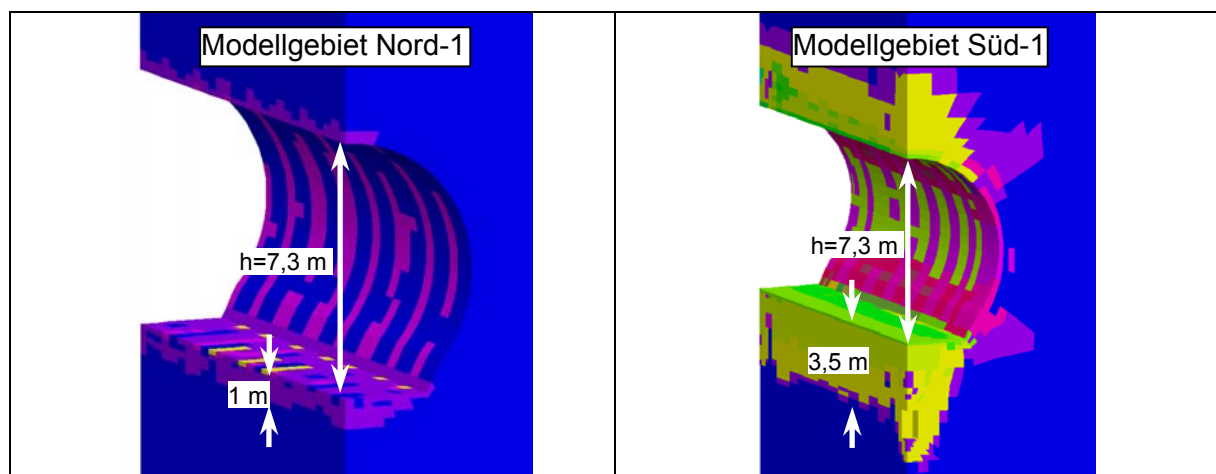


Abbildung 6-6: Plastifizierung des Gebirges um die linke Strecke, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1, nach der Auffahrung beider Strecken (unterschiedliche Farben markieren unterschiedliche Versagensmodi)

### Druckspannungen im Ausbau

Ein Vergleich der für den Ausbau berechneten Druckspannungen infolge der Auffahrung ist in Abbildung 6-7 zu sehen. Die Ausbaubelastungen im Modellgebiet Nord-1 entsprechen ungefähr der Hälfte der Belastungen im Modellgebiet Süd-1. Im Modellgebiet Nord-1 werden maximale Druckspannungen von 45 MPa und im Großteil der Betonschale zwischen 20 und 35 MPa erreicht. Im Modellgebiet Süd-1 dagegen wurden im Übergang Sohle-Stoß bis zu 100 MPa Druckspannung ausgewiesen. Der Großteil des Ausbaus weist Druckspannungen zwischen 40 und 70 MPa auf. Die Erscheinungsbilder der Druckspannungen unterscheiden sich in linker und rechter Strecke kaum. Da die linke Strecke geringfügig höher Spannungen im Ausbau aufweist, wird stets nur die linke Strecke dargestellt. Bei der rein elastischen Betrachtung des Ausbaus im Modellgebiet Süd-1 stellen die ermittelten Spannungen nach den Festigkeitsvorgaben aus Abbildung 6-5 eine Überbeanspruchung der Betonschale dar.

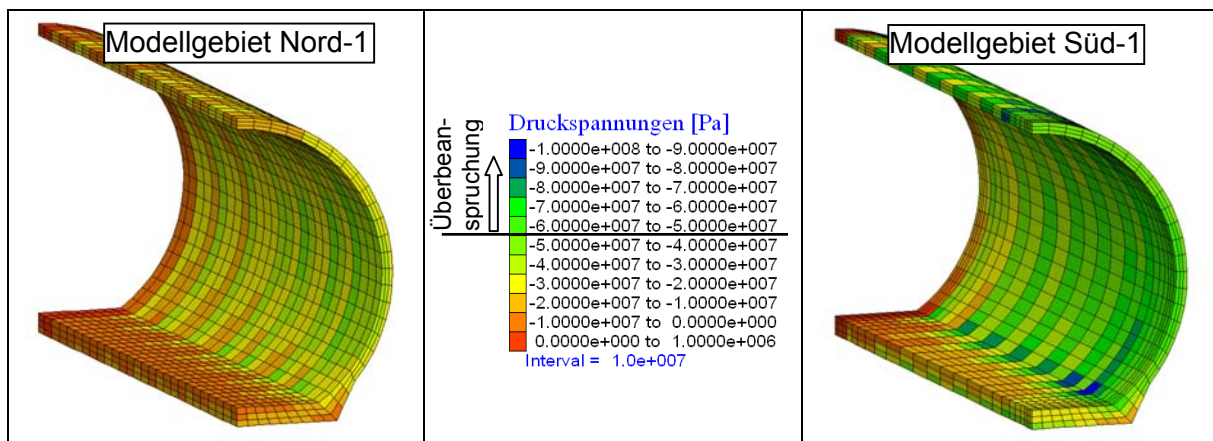


Abbildung 6-7: Druckspannungen im Ausbau der linken Strecke, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

### Verschiebungen der Streckenkontur

Im Verschiebungsfeld des Ausbaus zeigen sich ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Modellgebieten (Abbildung 6-8). Zur Verdeutlichung wird der Ausgangszustand als hellgraues Netz in den Abbildungen gezeigt. Im Modellgebiet Nord-1 wurden in den Berechnungen Firstverschiebungen von 1,4 cm und Sohlhebungen von ca. 1,2 cm ausgewiesen. Im Modellgebiet Süd-1 betragen die maximalen Verschiebungen ca. 3,2 cm. Durch die 50-fach vergrößerte Darstellung der Verschiebungen werden auch die einzelnen Abschlätze deutlich.

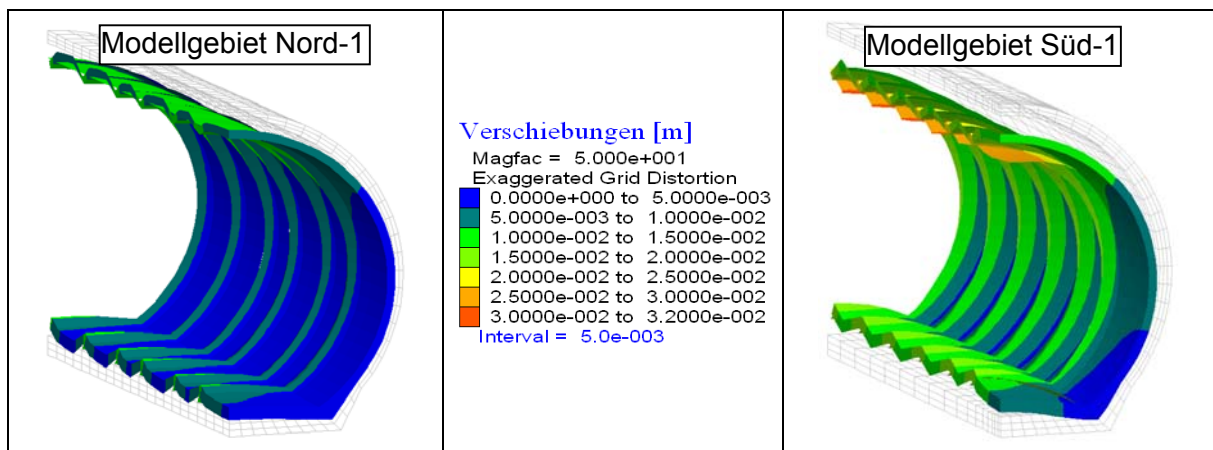


Abbildung 6-8: Verschiebungen des Ausbaus der linken Strecke, Modell Nord-1 (50-fach überhöht)

### Deviatorspannungen im Gebirge

In der folgenden Abbildung werden die auftretenden Deviatorspannungen (Vergleichsspannung nach Mises) im Gebirge dargestellt. Im Modellgebiet Nord-1 betragen die maximal auftretenden Deviatorspannungen ca. 18 MPa und treten unmittelbar an der Streckenkontur auf. In 2 m Entfernung von der Streckenkontur unterliegt der Großteil des Gebirges einer Deviatorspannung um 10 MPa. Die maximal ausgewiesenen Deviatorspannungen im Modellgebiet Süd-1 sind etwa 32 MPa. Die Abbildung 6-9 zeigt, dass im Modellgebiet Süd-1 viel weiter entfernte Gebirgsbereiche noch deviatorisch beeinflusst sind. Unterstellt man dem Tonstein ein – hier nicht berücksichtigtes – rheologisches Verhalten, so erwachsen aus dieser deviatorischen Belastung noch zusätzliche Lasten auf den Ausbau.

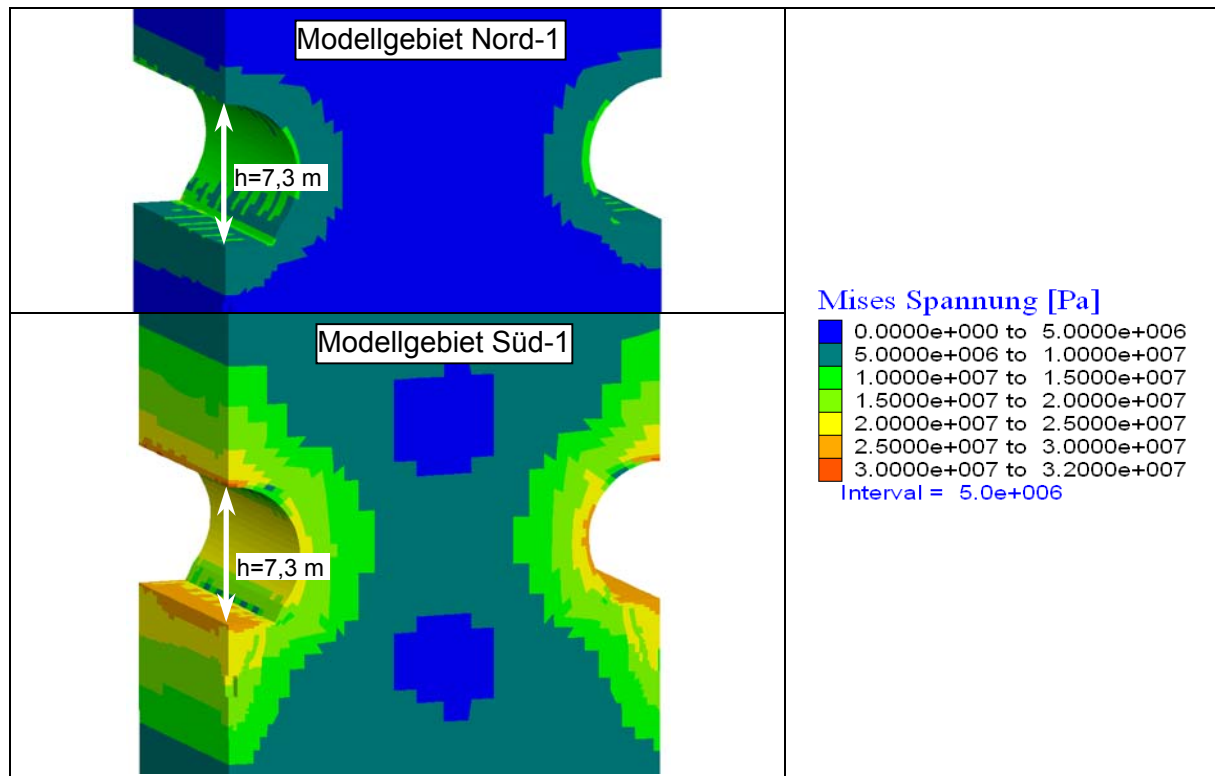


Abbildung 6-9: Deviatorspannungen (Mises) der Wirtsgesteine nach der Auffahrung, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1

### Porenwasserdruckverteilung im Gebirge

Im Tonstein ist durch die hydromechanische Kopplung mit einer auffahrungsbedingten Änderung des Porenwasserdrucks zu rechnen. Es wird davon ausgegangen, dass der verwendete Beton etwas größere Durchlässigkeiten besitzt als der Tonstein bzw. durch geeignete Maßnahmen ein Porenwasserdruckaufbau hinter der Tunnelschale verhindert wird. Es ergibt sich folgende Porenwasserdruckverteilung kurz nach der Auffahrung (Abbildung 6-10). Weitere Ergebnisse zur Porenwasserdruckentwicklung werden in Abschnitt 6.2.3 aufgezeigt.

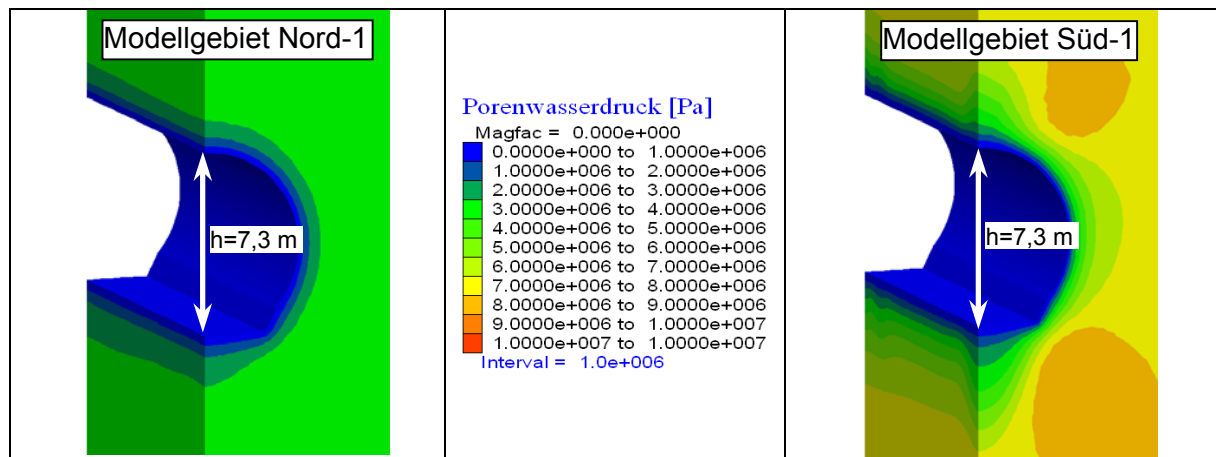


Abbildung 6-10: Porenwasserdruck im Tonstein nach der Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

### Biegemomentverteilung im Ausbau

Eine im Stahlbetonbau gebräuchliche Darstellung der Belastung ist die Darstellung von Biegemomenten und Normalkräften entlang der Tunnelkontur in der x-z-Ebene (siehe Abbildung 6-11). Es wurde eine Überprüfung der Genauigkeit an einem Modell mit einem 5 Zonen breiten Ausbau (vorangegangene Modelle basieren auf 3 Zonen Ausbau) durchgeführt, da die Biegemomente über die Spannungen der Ausbauzonen berechnet werden. Es ergaben sich Abweichungen von max. 10 % zwischen der 3-Zonen-Berechnung und der 5-Zonen-Berechnung. Diese relativ geringe Abweichung lässt die Auswertung von Biegemomenten und Normalspannungen in 3-Zonen-Ausbau-Modellen zu.

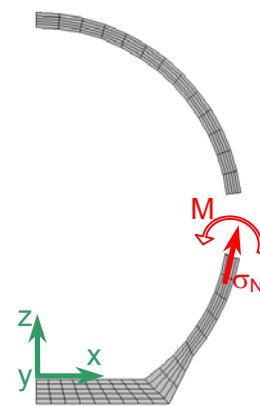


Abbildung 6-11: Darstellung von Normalspannung und Biegemoment

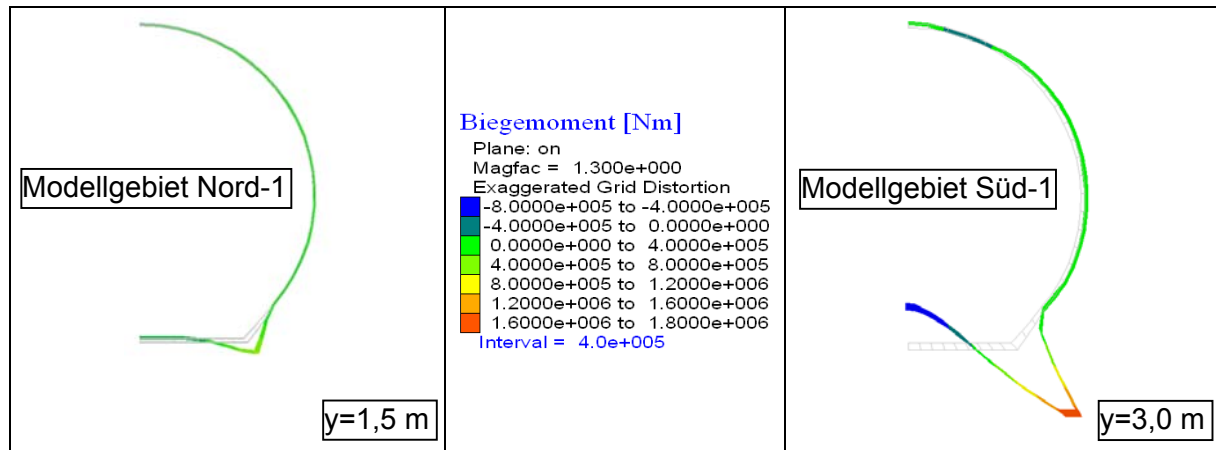
Die Biegemomentberechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} - \frac{M}{I} \cdot y \quad (6-4)$$

mit

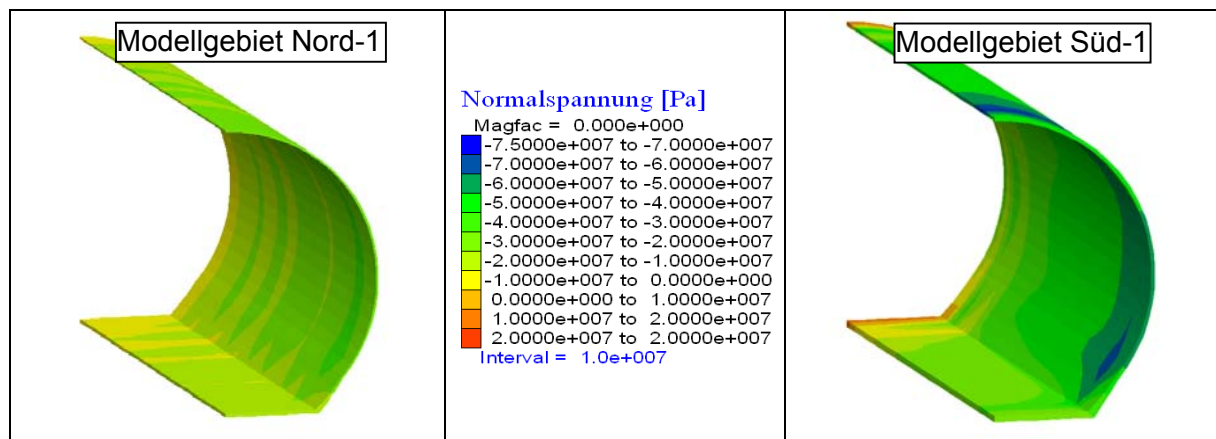
- $\sigma_N$  Normalspannung
- N Normalkraft
- A Fläche
- M Biegemoment
- I Flächenträgheitsmoment
- y Abstand zur Null-Faser

Die größten Biegemomente treten im Modellgebiet Nord-1 bei  $y=1,5$  m und im Modellgebiet Süd-1 bei  $y=3,0$  m im Übergang Sohle zu Stoß auf (siehe Abbildung 6-12). Aufgrund der Belastungssituation (-790 m) entstehen im Modellgebiet Süd-1 sehr große Biegemomente in der Betonschale (vgl. Druckspannungen in der Betonschale, Abbildung 6-7, S. 42) in diesem Bereich. In anderen Bereichen des Ausbaus kommt es zu geringen Biegemomenten mit einer gleichmäßigen Normalspannung.



**Abbildung 6-12: Biegemoment im Ausbau nach der Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1, unterschiedliche Schnitt-Ebenen**

Im Modellgebiet Süd-1 treten die größten Normalspannungen im Ausbau mit Werten bis 75 MPa auf. Die Normalspannungen im Ausbau im Modellgebiet Nord-1 erreichen Werte bis ca. 35 MPa. Die größten Normalspannungen werden innerhalb der ersten Abschlüge in der Strecke ausgewiesen (Abbildung 6-13).



**Abbildung 6-13: Normalspannung im Ausbau nach der Auffahrung, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1**

Bei Darstellung der Normalkräfte aller Elemente des Streckenausbau über ihren Biegemomenten wird das Wirken von Zugspannungen deutlich (Abbildung 6-14). Alle Punkte außerhalb der zwei schwarzen Geraden bedeuten Zugspannungen (berechnet für 0,5 m Betondicke in der Sohle und am Übergang zum Stoß, da in diesen Bereichen die größten Biegemomente auftreten). Diesen Zugspannungen muss durch entsprechende Bewehrung entgegengewirkt werden. Die Farbskala zeigt, dass große Biegemomente überall entlang der Strecke auftreten. Es handelt sich dabei hauptsächlich um die großen Biegemomente am Übergang Sohle-Stoß (siehe Abbildung 6-12).

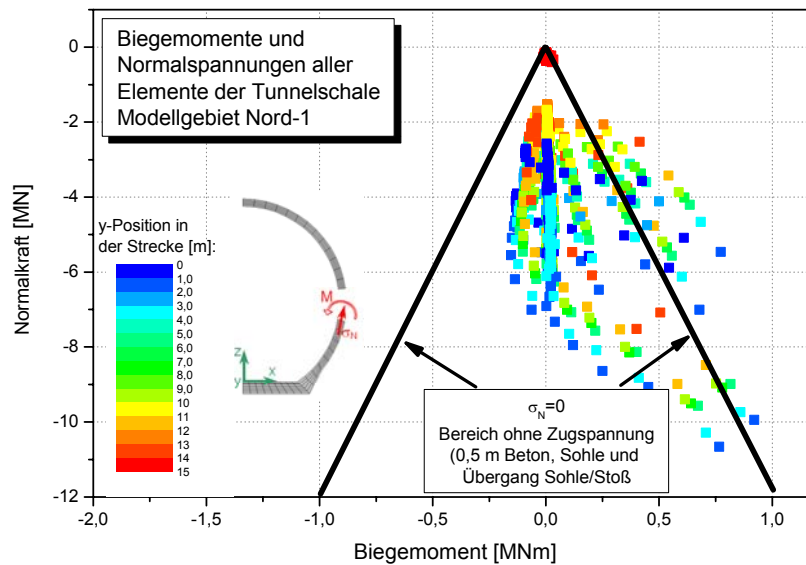


Abbildung 6-14: Darstellung der Normalkräfte über den Biegemomenten, Modellgebiet Nord-1

**Berechnungen mit verminderten Festigkeiten**

Um dem Einfluss von Inhomogenitäten im Gebirge und Ungenauigkeiten hinsichtlich der Gesteinsparameter Rechnung zu tragen, wurden Berechnungen mit verminderten Gebirgsfestigkeiten durchgeführt. Es wurden die kohäsiven Festigkeiten um 30% und die Reibungsfestigkeiten um 20 % abgemindert (Tabelle A-5 und A-6). Aufgrund der verminderten Festigkeit des Tonsteins kommt es in beiden Modellgebieten zu einem ca. 20 bis 30 % größeren Bereich an plastifizierten Zonen (vgl. Abbildung 6-6, S. 41).

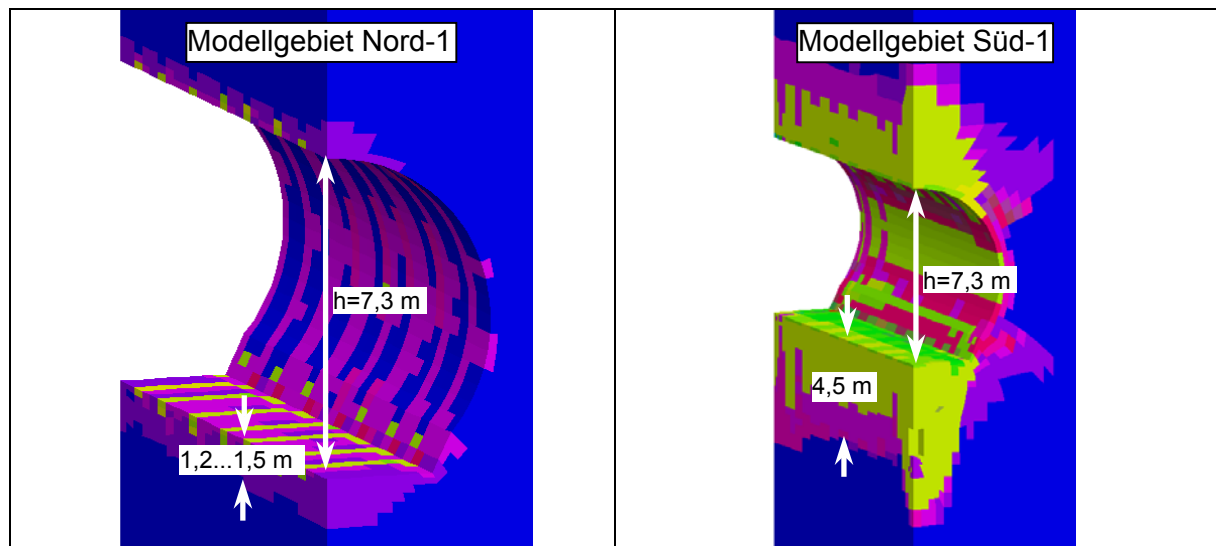


Abbildung 6-15: Plastifizierung des Gebirges um die linke Strecke, verminderte Festigkeiten, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 (unterschiedliche Farben markieren unterschiedliche Versagensmodi)

Die Belastung des Ausbaus kurz nach der Auffahrung bleibt für das Modellgebiet Nord-1 nahezu gleich, im Modellgebiet Süd-1 erhöhen sich die maximalen Druckspannungen (im Übergang Sohle-Stoß) um ca. 10 %.

### 6.2.2 Rheologisches Verhalten von Tonstein

Tonstein besitzt zeitabhängige Verformungseigenschaften. Das Gebirge strebt, ähnlich wie im Salz, ein Minimum an inneren deviatorischen Spannungen an. Der Unterschied zum Salz nach dem derzeitigen Kenntnisstand aber ist, dass Tonstein aufgrund seiner Schichtungseigenschaften anisotrope Grundspannungszustände haben kann. Bei der Anwendung des folgenden, relativ simplen Kriech-Stoffmodells (CPOW in FLAC 3D) wird diese Eigenschaft vernachlässigt. Bei Anwendung dieses Stoffmodell im Modell werden isotrope Spannungsverhältnisse angestrebt. Darauf folgend werden Kriechberechnungen im Tonstein von LUX et al. (2006b) mit ähnlichem Streckenausbau und implementierten HOU/LUX-T-Stoffgesetz (anisotroper Grundspannungszustand im Tonstein wird wieder angestrebt durch das Kriechen) vorgestellt.

#### Kriechberechnungen mit Norton-Ansatz

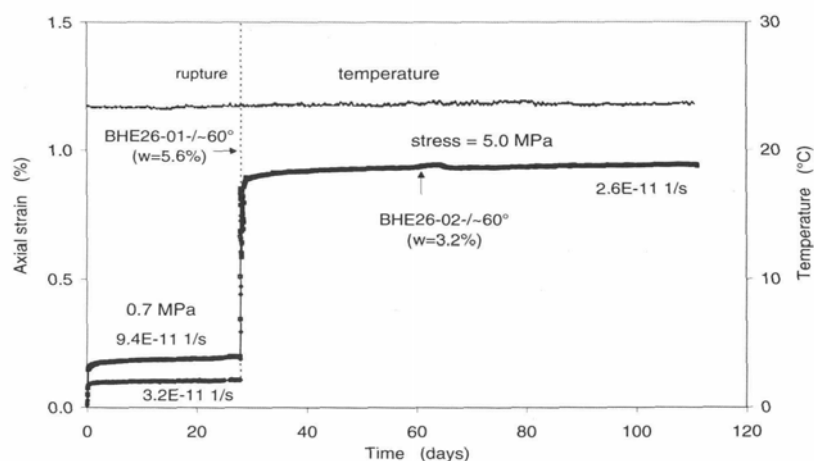
Es wurden die Modellgebiete Süd-1 und Nord-1 ohne eine Abminderung von Festigkeitswerten betrachtet. Die Kriechberechnungen wurden ohne hydraulischen und thermischen Einfluss durchgeführt. Zur Abschätzung des Einflusses der Kriecheffekte auf Gebirge und Ausbau wird folgendes Kriech-Stoffmodell verwendet (Norton-Ansatz):

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \sigma_{dev}^n \tag{6-5}$$

mit

- $\dot{\varepsilon}$  Kriechrate
- A Kriechfaktor =  $1 \cdot 10^{-43} \text{ s}^{-1}$
- n Kriechexponent = 5
- $\sigma_{dev}$  Deviatorspannung

Die verwendeten Kriechparameter wurden so abgeschätzt, dass ein Spannungsdeviator von 3 MPa eine Kriechrate von ca.  $2 \cdot 10^{-11} \text{ 1/s}$  bewirkt (in Ergebnissen von ZHANG et al. 2004 beträgt die Kriechrate  $2,6 \cdot 10^{-11}$  bei 5 MPa einaxialer Druckspannung, Abbildung 6-16). Es wurde ein Schwellwert für das Kriechen von 1 MPa gewählt. ZHANG et al. (2004) führte Kriechversuche an Opalinuston und Callovo Oxfordian mit z. T. geringen Druckspannungen von 0,6 bis 1,0 MPa durch und zeigte in Experimenten das Kriechverhalten auch bei geringen Spannungen.



**Abbildung 6-16: Kriechkurven von Opalinuston aus Mt. Terri (HEB Erhitzerversuch, aus ZHANG et al. 2004)**

Die Abbildung 6-17 zeigt den Abbau der Deviatorspannungen im Gebirge bei gleichzeitiger Erhöhung der Druckspannungen im Ausbau (Mittelung über den gesamten Ausbau). Es werden in Einzelbereichen extrem hohe Druckspannungen bis 360 MPa im Modellgebiet Süd-1

nach 5 Jahren Berechnungszeit ausgewiesen. Diese extrem hohen Spannungen treten im Modell nur durch die Annahme eines ideal elastischen Ausbaus bzw. aufgrund der gewählten Geometrie und Diskretisierung auf. In der Realität würden diese hohen Spannungen nicht entstehen. Diese Spannungen stellen hier ein Indiz für die Ausbaubelastung dar.

Verglichen mit den berechneten Druckspannungen nach der Auffahrung (Abbildung 6-7, S. 42) entspricht dies einer Erhöhung der Belastung um den Faktor 3,5. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Deviatorspannungen nach 5 Jahren Berechnungszeit noch nicht vollständig bis auf die verbleibende Rest-Deviatorspannung von 1 MPa abgebaut sind.

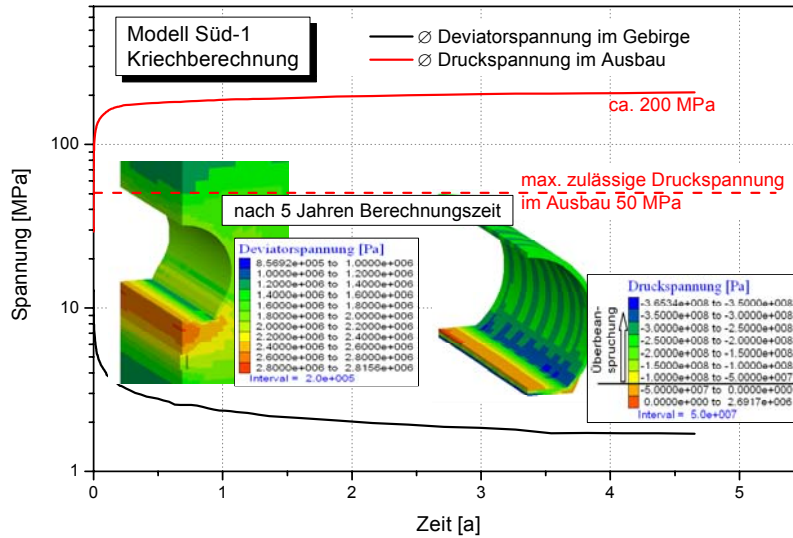


Abbildung 6-17: Kriechberechnung mit Norton-Ansatz, Modellgebiet Süd-1

Im Modellgebiet Nord-1 zeigen sich die gleichen Effekte aufgrund des Kriechens wie im Modellgebiet Süd-1. Im Ausbau hat sich nach 5 Jahren Berechnungszeit eine mittlere Druckspannung von 75 MPa und eine maximale Druckspannung von 130 MPa eingestellt. Die Deviatorspannungen im Gebirge von ca. 1,5 MPa weisen darauf hin, dass die Kriechvorgänge noch nicht abgeschlossen sind.

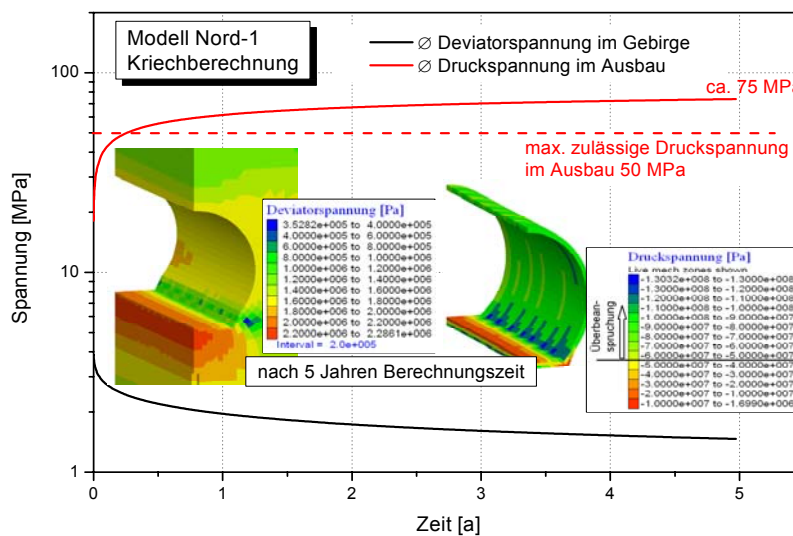


Abbildung 6-18: Kriechberechnung mit Norton-Ansatz, Modellgebiet Nord-1



Die Kriechberechnungen unter Verwendung des Norton-Ansatzes weisen für beide Modellgebiete eine Überbeanspruchung des Streckenausbaus aufgrund der Spannungsumlagerung und des rheologischen Materialverhaltens aus.

**Kriechberechnungen mit HOU-LUX-T**

In LUX et al. (2006b) wurden Berechnungen einer Streckenauffahrung im Tonstein mit einer 30 cm starken Betonschale (elastisch) vorgestellt. Das verwendete Stoffgesetz wurde speziell für Tonsteine entwickelt und beinhaltet elastische, plastische und viskose Verformungen gekoppelt mit thermischen und hydraulischen Bedingungen (Einbeziehung von Schädigung und wassergehaltsabhängiger Festigkeit). Eine nähere Beschreibung befindet sich in LUX et al. (2006a). Die Fließgrenze wurde für den Opalinuston entsprechend der linearen Mohr-Coulomb-Kurve in Abbildung 6-1 (S. 37) gewählt. Die maximalen Spannungen in diesem Modell betragen in der Tunnelschale nach der Auffahrung ca. 100 MPa. Die Spannungen in der Tunnelschale nach 1 Jahr und 4 Jahre Berechnungszeit sind in Abbildung 6-19 dargestellt. Nach einem Jahr wird eine Spannungserhöhung von ca. 30 % und nach 4 Jahren von 100 % gegenüber dem Ausgangszustand nach der Auffahrung ausgewiesen. Zur Verdeutlichung sind die Spannungsentwicklungen im Ausbau in Abbildung 6-20 dargestellt. Die Kurvenverläufe zeigen, dass die Spannungserhöhung nach 4 Jahren nicht abgeschlossen ist. Die ermittelten Spannungen weisen auf eine deutliche Überbelastung der Streckenausbauten hin. Die Spannungserhöhung aufgrund der Kriechprozesse im Tonstein ist bei Verwendung des HOU/LUX-T- Stoffgesetzes etwas langsamer als in den Abschätzungen in den Abbildungen 6-17 und 6-18. Diese Ergebnisse zur Spannungsumlagerung aufgrund des Kriechens verdeutlichen hinsichtlich der Endlagerplanungen im Tonstein nicht nur die Bedeutung einer genauen Kenntnis von Festigkeitsparametern sondern ebenso die Kenntnis über zeitabhängige Verformungseigenschaften.

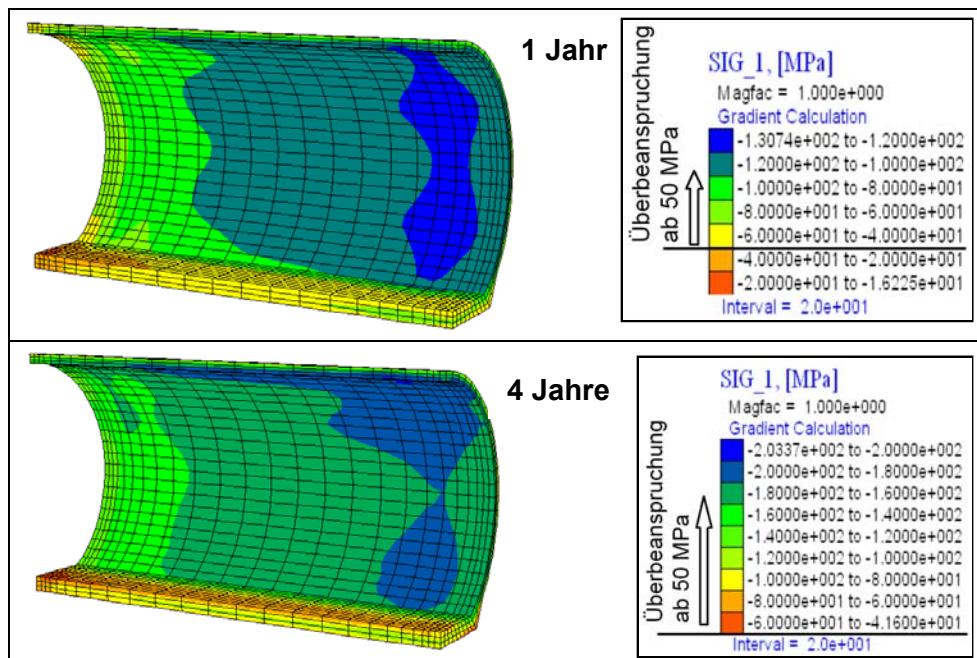
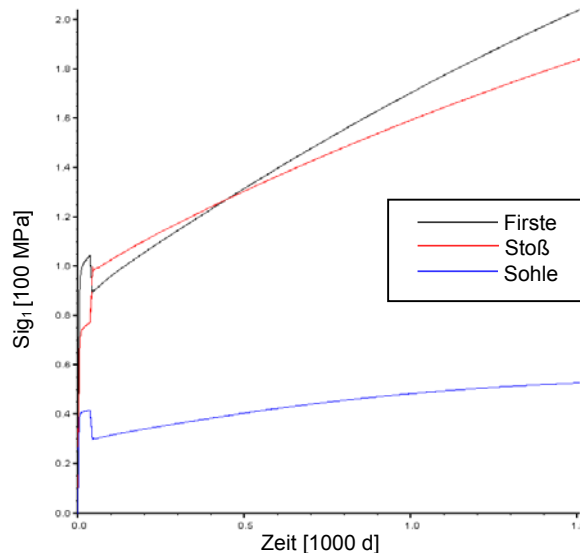


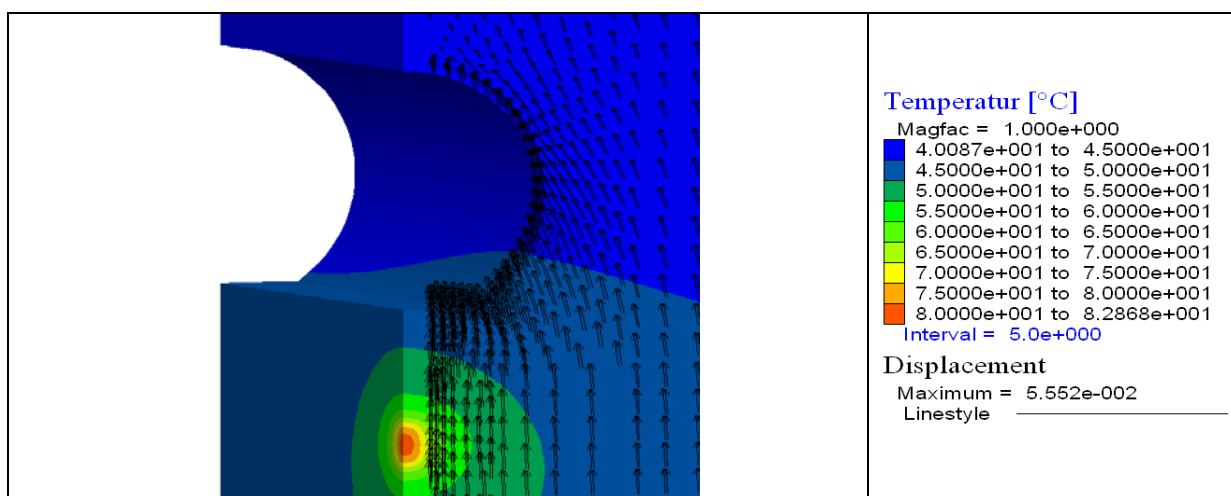
Abbildung 6-19: Maximale Spannung im Ausbau nach 1 und 4 Jahren, HOU/LUX-T-Stoffmodell, Tunnelschale im Tonstein, ca. 800 m Teufe (LUX et al (2006b))



**Abbildung 6-20:** Spannungsentwicklung im Betonausbau für den Zeitraum von 4 Jahren (ab der Auffahrung), Berechnung mit HOU/LUX-T (LUX et al. (2006b))

### 6.2.3 Der Einfluss des Wärmeeintrags durch die Behälter

Infolge des Wärmeeintrags durch die HAW-Kokillen im Bohrloch kommt es zur Aufheizung und damit in erster Linie zu einer Hebung des gesamten betrachteten Bereichs (Abbildung 6-21). Die Veränderungen im Spannungsfeld des Ausbaus sind relativ gering. Die thermisch induzierte, zusätzliche Druckspannung im Ausbau des Modellgebiet Süd-1 beträgt nach 10 Jahren Berechnungszeit ca. 8 MPa, was aufgrund der relativ hohen Druckspannungen nach der Auffahrung bis 100 MPa nur eine geringe Änderung darstellt. Der Streckenausbau im Modellgebiet Nord-1 bekommt eine maximale zusätzliche Last von 10 MPa, was in einigen Bereichen zu einer Überbeanspruchung des Ausbaus führt (siehe Abbildung 6-7, S. 42). Die infolge der thermisch induzierten Spannungen hervorgerufenen Veränderungen in der Größe und Ausbreitung von versagten bzw. plastifizierten Gebirgsbereichen sowie der Größe der Deviatorspannungen im Gebirge sind marginal.



**Abbildung 6-21:** Temperatur und Verschiebung nach 10 Jahren, Modell Süd-1

Die Temperaturunterschiede im Ausbau zum betrachteten Zeitpunkt sind in beiden Modellgebieten relativ gering (zwischen 5 und 10 K). Eine gleichmäßige Temperaturzunahme im Ausbau hat geringe Spannungsunterschiede und demzufolge geringere Belastungen für den

Ausbau zur Folge. Das Modellgebiet Süd-1 hat aufgrund seiner Tiefenlage ein höheres Grundtemperaturniveau (vgl. Kapitel 3).

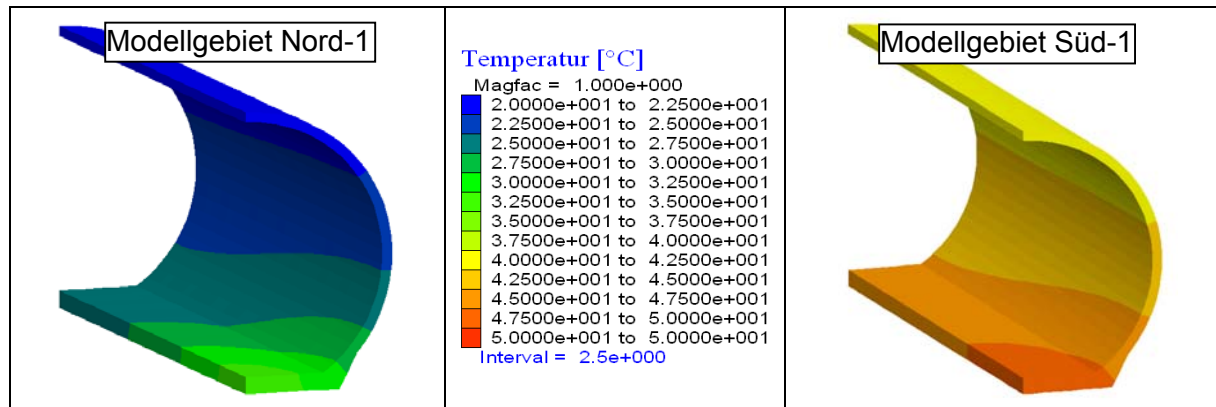


Abbildung 6-22: Temperaturen im Ausbau nach 10 Jahren, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1

Die thermische Expansion des Gebirges äußert sich zum einen in einer Hebung (siehe Abbildung 6-21) und zum anderen in einer Erhöhung des Porenwasserdrucks im Gebirge. Dies tritt vor allem in Bereichen um die Einlagerungsbehälter auf. Die folgende Abbildung zeigt die Änderungen des Porenwasserdrucks im Gebirge gegenüber dem Ausgangszustand nach einer Berechnungszeit von 10 Jahren. Dabei ist der maximale Porenwasserdruck in beiden Modellgebieten mit ca. 10 MPa etwa gleich. Dieser wird bestimmt durch die thermo-mechanische Formänderungsarbeit entsprechend der Tiefenlage und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Aufgrund der geringen Permeabilitäten wird dieser Porenwasserdruck nur sehr langsam abgebaut. Im Modell wurden vereinfachend nur die HAW-Kokillen und Tonstein verwendet. In diesem Modell wurde vereinfachend auf eine Bentonit-Ummantelung verzichtet. Die maximalen Porenwasserdruckänderungen betragen ca. 7 MPa im Modellgebiet Nord-1 und ca. 2,5 MPa im Modellgebiet Süd-1 (siehe Abbildung 6-23). Ausgehend von einer Porosität in der geotechnischen Barriere Bentonit ist der entstehende Porenwasserdruck in der Gebirgsumgebung der Behälter hilfreich bei dem gewünschten Einschluss der Behälter (Kriechprozesse im Tonstein). Inwieweit dies die Offenhaltung benachbarter Bohrlöcher berührt, wird in einem Anschlussvorhaben untersucht.

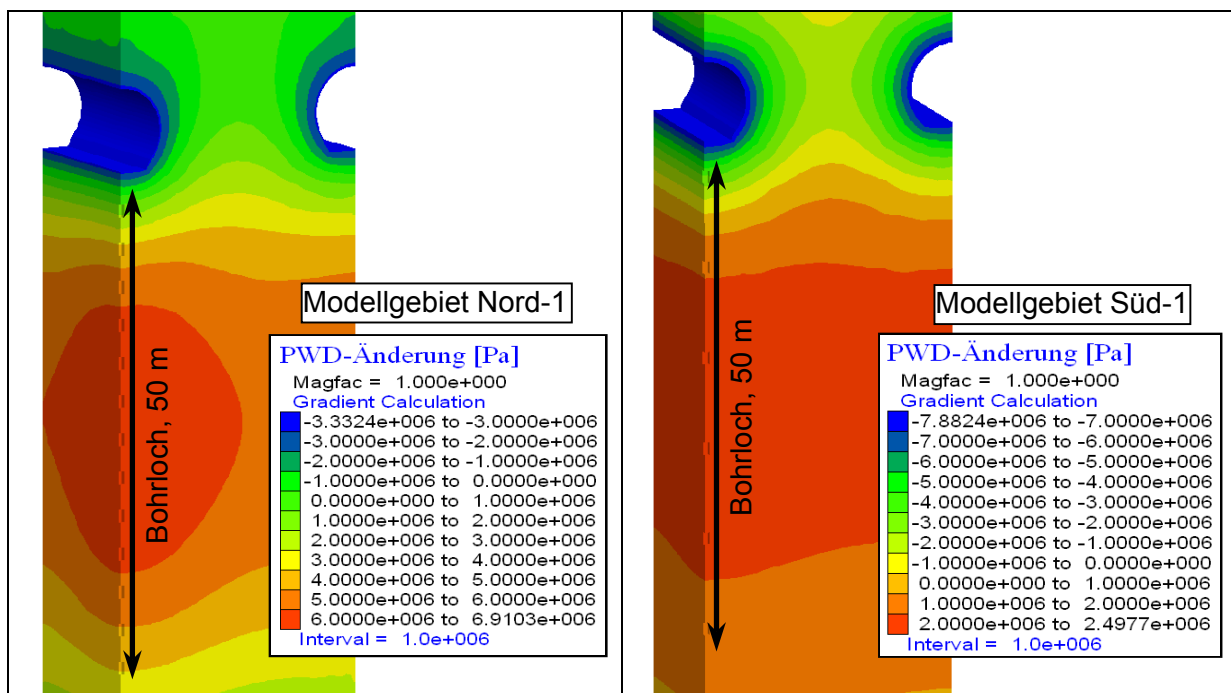


Abbildung 6-23: Porenwasserdruckänderungen nach 10 Jahren, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1

### 6.3 Stabilitätsanalyse der Strecken bei Streckenlagerung

Die Stabilitätsanalyse zum Konzept Streckenlagerung wurde anhand eines Modells mit zwei Strecken und versetzt angeordneten Behältern durchgeführt (Abbildung 6-24). Die Geometrien wurden entsprechend den Vorgaben und Ergebnissen aus Kapitel 4 gewählt. Es wurden nur die Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 betrachtet. Im Gegensatz zu den Strecken der Bohrlochlagerung wurde ein kreisrunder Querschnitt infolge der Auffahrung mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) betrachtet. Für den Ausbau werden vorgefertigte Betonelemente für den Ausbau (sog. Tübbings, angenommene Druckfestigkeit 50 MPa) angenommen, welche nach der Einbringung mit einer Betonsuspension hinterfüllt werden. Abbildung 6-25 zeigt die Details des Modells. Die Ummantelung des Behälters entspricht den Angaben nach Abbildung 4-8 (S. 23). Direkt unter dem POLLUX-3- Behälter befindet sich ein Behälterauflager.



Abbildung 6-24: Modell zur Stabilitätsanalyse bei Streckenlagerung, Grundriss

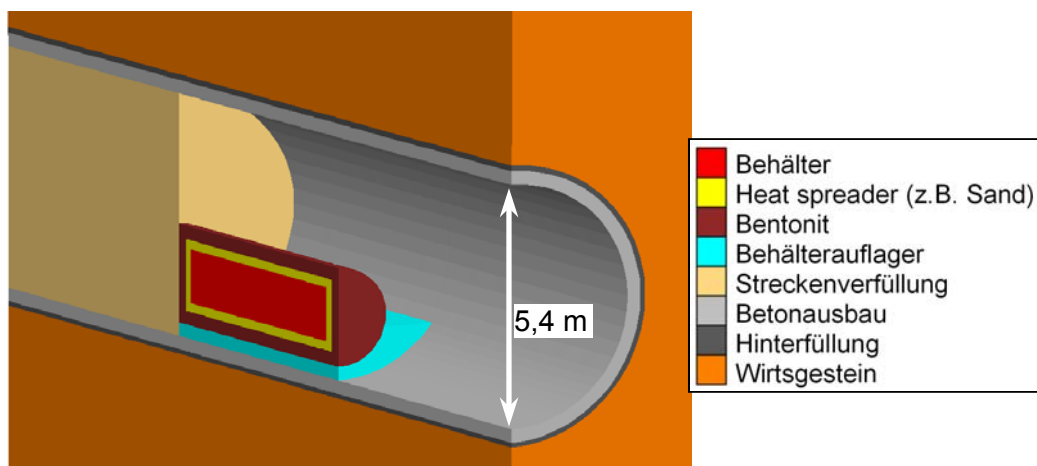


Abbildung 6-25: Modell zur Stabilitätsanalyse Streckenlagerung, Details

Es wurden folgende Einlagerungsvarianten betrachtet:

Tabelle 6-2: In der Stabilitätsanalyse betrachtete Varianten zur Streckenlagerung

Variante	Zwischenlagerzeit [a]	Behälterabstand [m]	Streckenabstand [m]
Süd-1 POLLUX gB	31	26	45
Nord-1 POLLUX gB	20	15	34

Es wurden thermo-mechanische Berechnungen durchgeführt. Das Wirtsgestein wurde elastoplastisch angenommen. Neben den Materialparametern nach Kapitel 6.1 und der Steifigkeitsentwicklung des Betons nach Kapitel 6.2 wurden weitere Materialparameter notwen-

dig für die Modellierung. Die Steifigkeit und Poissonzahl der Hinterfüllung (Injektionsgut) wurde über eine Zeitfunktion gesteuert (BILLAUX 2006). Die 28-Tage-Steifigkeit der Hinterfüllung beträgt 1 GPa mit einer Poissonzahl von 0,2. Weitere benötigte Parameter sind im Anhang in Tabelle A-11 dargestellt.

Die Auffahrung erfolgt sukzessiv mit einem Radius von 3,12 m. Die besondere Form der TBM (Abbildung 6-26) wurde nach Erfahrungswerten von BILLAUX (2006) gewählt. Der Außenradius des Tübbing-Ausbau ist 6,0 m. Mit Einbeziehung der Deformationen des Gebirges verbleiben somit ein Spalt für die Hinterfüllung von ca. 10 cm. Die TBM hat während des Vortriebs immer Kontakt zur Streckensohle. Die Form der TBM ist für die Spannungsumverteilung im Gebirge nach der Auffahrung und deshalb auch für die Lasten auf den Ausbau entscheidend. Der genaue Ablauf des Vortriebs im Modell ist in BILLAUX (2006) beschrieben.

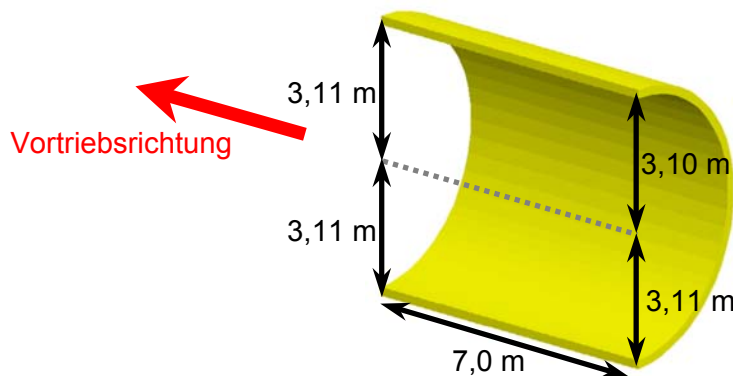


Abbildung 6-26: Darstellung der Tunnelbohrmaschine im Modell mit den Abmessungen

### 6.3.1 Die Auffahrung der Strecken

Die Auffahrung der Strecken erfolgt mittels TBM. Beeinflusst durch den Grundspannungszustand entstehen entsprechende plastifizierte Zonen in der Umgebung der Auffahrung (Abbildung 6-28). Aufgrund der geringen Teufenlage ist im Modell Nord-1 kaum eine Plastifizierung zu erkennen. Im Modell Süd-1 dagegen versagen Bereiche um die Tunnelkontur im Sohlbereich bis 1,5 m und im Firstbereich bis ca. 2,5 m. Die Gebirgsverschiebungen können infolge des zeitigen Stellens eines steifen Ausbaus gering gehalten werden. Im Modell Nord-1 betragen die maximalen Verschiebungen ca. 1 cm; im Modell Süd-1 bis ca. 3 cm. Der Großteil dieser Konvergenzen wird dabei von der relativ weichen Hinterfüllung aufgenommen. Die Abbildung 6-27 zeigt die Verschiebungen im Ausbau durch die Auffahrung. Die größeren Bewegungen in der Tunnelschale treten im Sohlbereich auf, da aufgrund der Auffahrung mittels TBM während der Auffahrung größere Gebirgskonvergenzen im Firstbereich zugelassen werden und damit an dieser Stelle geringere Spannungen auf den Ausbau übertragen werden.

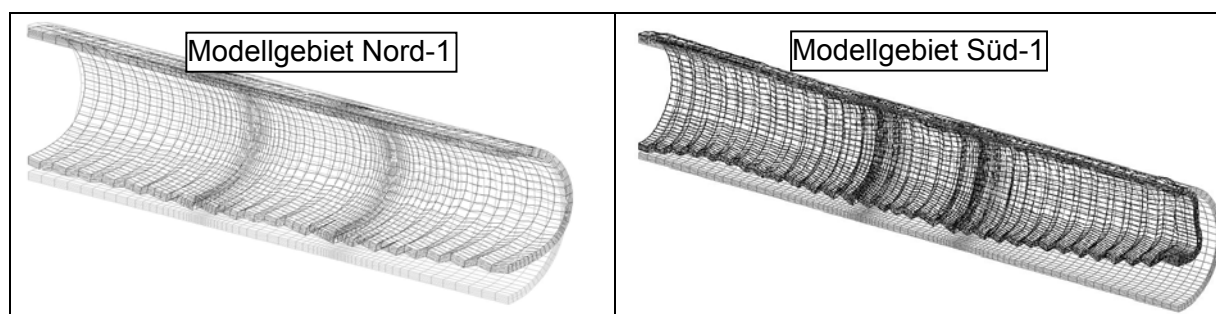


Abbildung 6-27: Verschiebungen durch die Auffahrung (x 300), Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

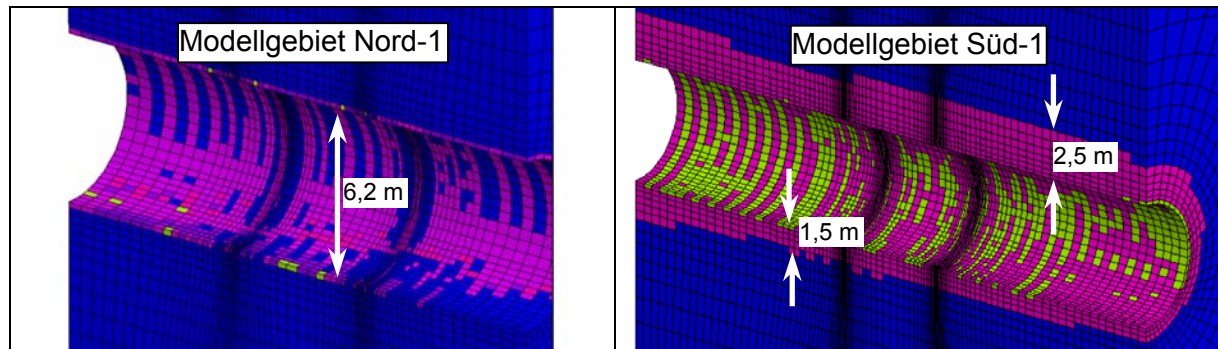


Abbildung 6-28: Plastifizierung durch die Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 (unterschiedliche Farben markieren unterschiedliche Versagensmodi)

### 6.3.2 Der Einfluss des Wärmeeintrags durch die Behälter

Die folgenden Abbildungen zeigen die berechneten Druckspannungen im Ausbau direkt nach der Auffahrung und nach 5 Jahren Einlagerungsdauer für beide betrachtete Modelle. Nach den 5 Jahren Berechnungszeit ist ungefähr die maximale Temperatur in der Bentonit-Ummantelung erreicht. Im direkten Vergleich wird der große Unterschied zwischen dem Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 deutlich. Nach der Auffahrung werden in der 30 cm Betonschale im Modellgebiet Nord-1 ca. 10 MPa, teilweise zwischen 10 und 20 MPa ausgewiesen. Im Modellgebiet Süd-1 betragen die Druckspannungen bereits nach der Auffahrung zwischen 30 und 50 MPa, vereinzelt bis 60 MPa. Die Wärmeentwicklung der Behälter verursacht Veränderungen im Spannungsfeld. Aufgrund der kraftschlüssigen Anordnung der Tübbings kommt es vor allem entlang der Tunnelachse zu großen Spannungen im Ausbau. Im Modellgebiet Nord-1 werden in Behälternähe Druckspannungen bis 40 MPa ausgewiesen, der Großteil des Ausbaus befindet sich in einem Spannungsbereich zwischen 10 und 20 MPa. Im Modellgebiet Süd-1 bleibt das schon anfänglich hohe Druckspannungsniveau erhalten, nur in Behälternähe kommt es zu einer Druckspannungszunahme auf maximal 76 MPa. Dies stellt eine Überbeanspruchung der Betonschale dar (Spannungen größer 50 MPa).

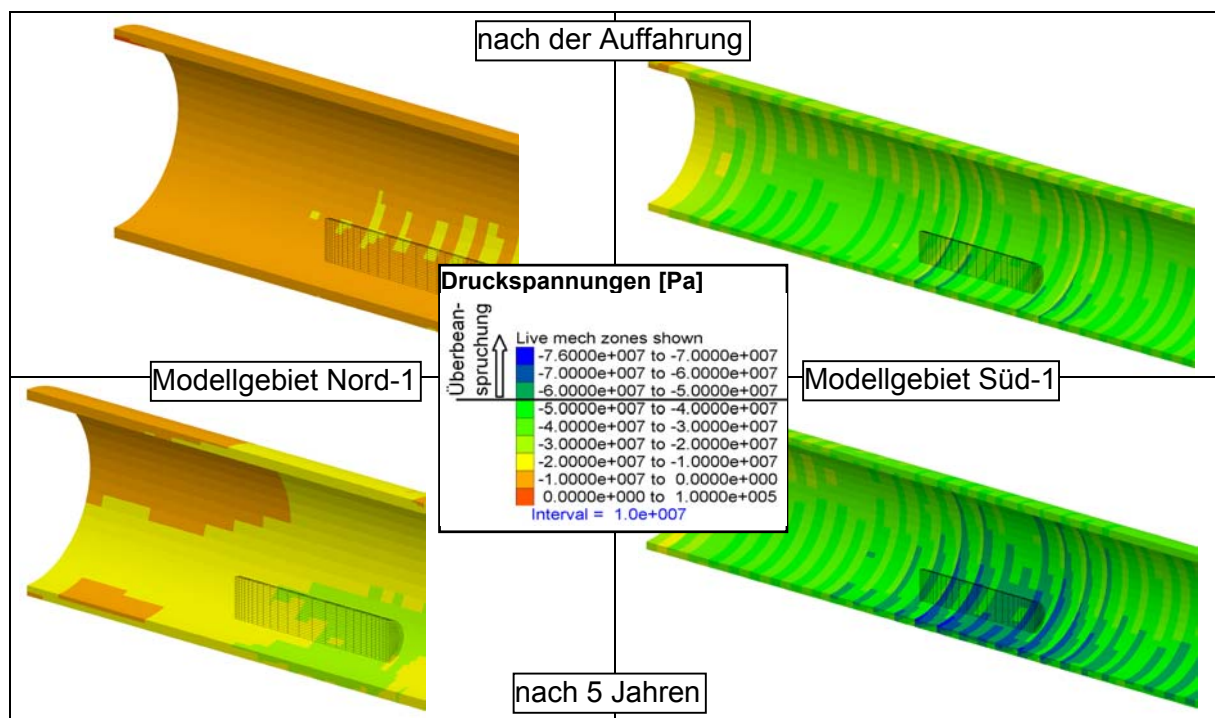


Abbildung 6-29: Druckspannungen im Ausbau, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

Zusätzliche Belastungen auf den Ausbau, welche hier nicht explizit betrachtet wurden, entstehen durch den Abbau der Deviatorspannungen im Gebirge. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6-30 die Mises-Spannungen (Deviatorspannung) im Gebirge der betrachteten Modellgebiete zu den Zeitpunkten nach der Auffahrung und nach 5 Jahren dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für alle Darstellungen die gleiche Farbskalierung gewählt. Es ist davon auszugehen, dass durch die rheologischen Eigenschaften des Gebirges (Kriechen) ein Abbau dieser – sowohl auffahrungsbedingten als auch thermisch induzierten – deviatorischen Spannungen stattfindet. In beiden Modellgebieten kommt es aufgrund der Aufheizung des Gebirges zu einer thermischen Expansion der Materialien und damit zu einer Zunahme der Mises-Spannungen. In den Berechnungen wird der Abbau der deviatorischen Spannungen durch das rheologische Verhalten vernachlässigt. Daher überschätzen die Berechnungsergebnisse die entstehenden effektiven Spannungen (konservative Berechnungsergebnisse). Die Ergebnisse sollten vergleichend betrachtet werden.

Nach der Auffahrung werden im Modellgebiet Nord-1 ca. 10 MPa, nach 5 Jahren bis zu 17,5 MPa Mises-Spannung ausgewiesen. Im Modellgebiet Süd-1 betragen die Mises-Vergleichsspannungen nach der Auffahrung bis ca. 20 MPa und nach 5 Jahren sogar über 20 MPa. In den Darstellungen des Modellgebiets Süd-1 wird der Einfluss plastifizierten Zone mit der Vergleichmäßigung der Spannungen deutlich. Die hohen Deviatorspannungen entstehen erst in einiger Entfernung zum Ausbau.

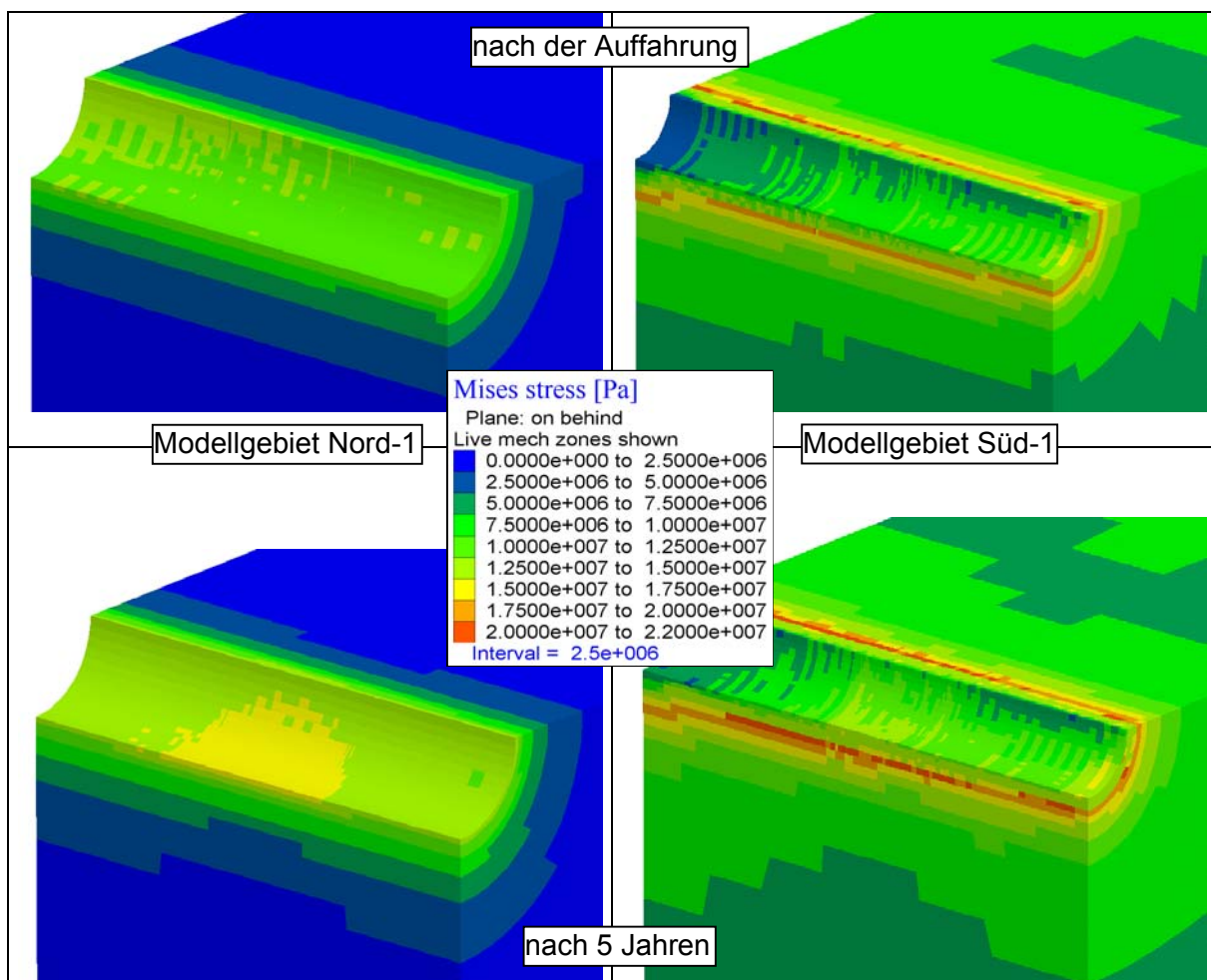
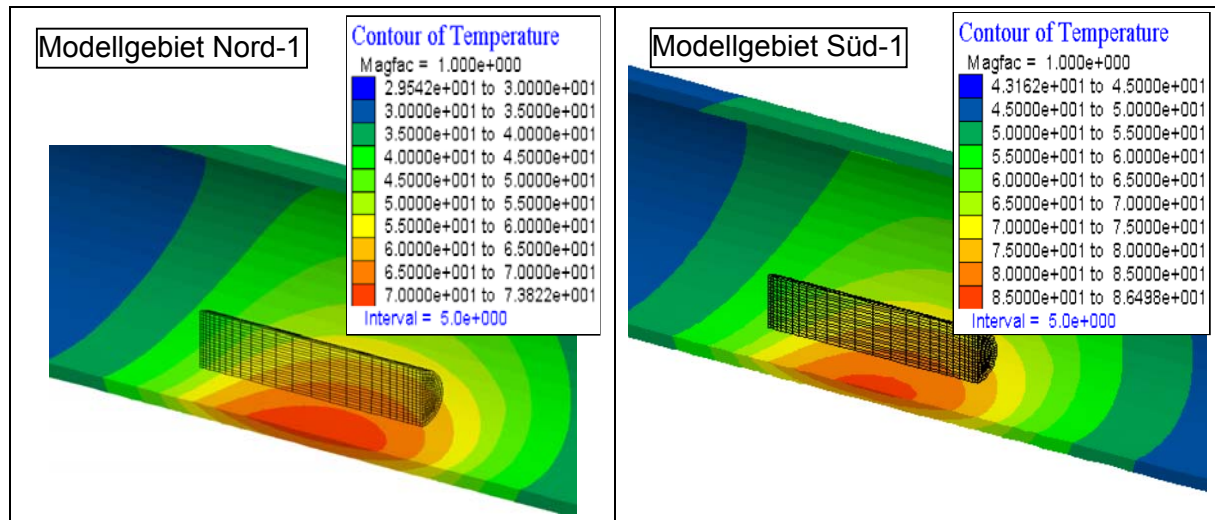


Abbildung 6-30: Mises-Spannungen im Gebirge, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

Die Abbildung 6-31 zeigt die Temperaturen im Ausbau nach 5 Jahren Berechnungszeit. Durch den geringen Abstand des Einlagerungsbehälters zur Sohle erwärmt sich dieser stärker als der restliche Ausbau. Diese inhomogene Wärmeverteilung hat Einfluss auf die Druck-

spannungen in den verschiedenen Bereichen des Ausbaus (siehe Abbildung 6-29). Die maximale Temperatur zu diesem Zeitpunkt unterscheidet sich geringfügig in den zwei betrachteten Modellgebieten infolge unterschiedlicher Wärmeleistungen bzw. Materialparameter.



**Abbildung 6-31: Temperaturen im Ausbau nach 5 Jahren, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1**

Bei Betrachtung der Biegemomente im Ausbau (Abbildung 6-32) werden die unterschiedlichen Randbedingungen der betrachteten generischen Endlager deutlich. Im Gegensatz zur Bohrlochlagerung wird nun eine 3-dimensionale Darstellung der Biegemomentverteilung verwendet. Im Modellgebiet Nord-1 treten aufgrund geringer Plastifizierung um die Betonschale entlang der Streckenachse gleichmäßige Biegemomente bis ca. 70 KNm auf. Die tiefreichende Plastifizierung (Abbildung 6-28) um den Ausbau des Modellgebiets Süd-1 verteilt die hier größeren Gebirgslasten besser und bewirkt - die gesamte Schale betrachtend - ähnliche Biegemomente wie im Modellgebiet Nord-1. Lokal (in der Umgebung des Behälters) kommt es zu größeren Biegemomenten als im Modellgebiet Nord-1.

Die Wärmeabgabe der Behälter verursacht eine veränderte Belastungssituation im Beton. Aufgrund der thermischen Expansion der Betonschale kommt es in Behälternähe zu deutlich größeren Biegemomenten in beiden Modellgebieten.

Die thermomechanischen Berechnungen wurden bis zu einer Berechnungszeit von 100 Jahren durchgeführt. Die Berechnungen weisen über diesen Zeitraum eine weitere Erwärmung des umgebenden Wirtsgesteins aus. Aufgrund der fortschreitenden thermischen Expansion kommt es dabei zu erhöhtem horizontalem Druck und dementsprechender Verformung der Betonschale (BILLAUX 2006). Hierbei muss beachtet werden, dass keine rheologischen Eigenschaften der Tonsteine berücksichtigt wurden. Diese können vor allem in der Langzeitbetrachtung erhebliche Unterschiede bewirken. Die dargestellten Belastungen und Verformungen sollen die rein thermische Wirkung verdeutlichen. Ausgehend von den Berechnungen zum zeitlichen Deformationsverhalten von Tonstein und Mises-Spannungen in Abbildung 6-30 muss von einer zusätzlichen Belastung durch Kriechprozesse ausgegangen werden.



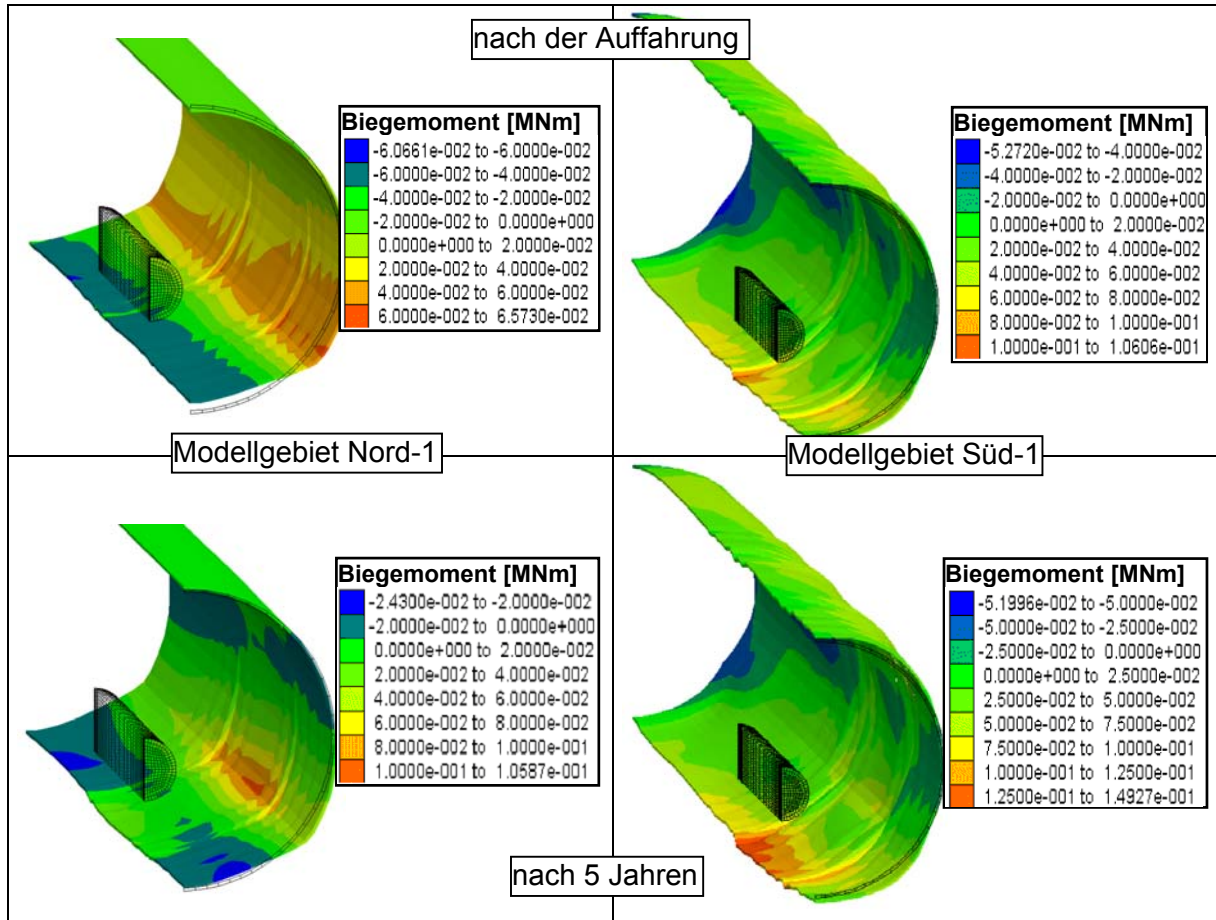


Abbildung 6-32: Biegemomente im Ausbau, nach der Auffahrung und nach 5 Jahren, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1

Die folgende Abbildung zeigt die Normalkräfte aller Elemente der Betonschale über den Biegemomenten für beide Modellgebiete. Alle Punkte befinden sich innerhalb der roten Markierung, welche die Grenze für eine zugspannungsfreie Belastung darstellt (siehe Kapitel 6.2.1). Bei Beachtung der unterschiedlichen Skalierung der y-Achse werden die höheren Druckkräfte im Beton, bewirkt durch größere Grundspannungen im Modellgebiet Süd-1, deutlich. Im Vergleich mit Abbildung 6-14 (S. 46) ist im Ausbau der Streckenlagerung die Kraftverteilung günstiger. Im Gegensatz zum nicht vollständig kreisförmig angenommenen Ausbau der Bohrlochlagerung kommt es hier zu keinen Zugspannungen.

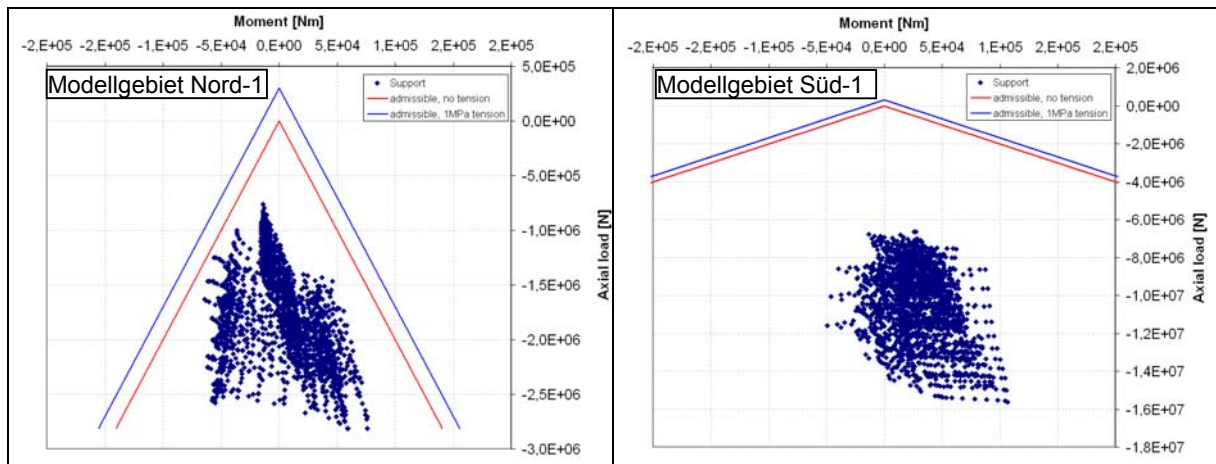


Abbildung 6-33: Normalkräfte über den Biegemomenten in der Betonschale, Modellgebiet Süd-1, Nord-1

### 6.3.3 Berechnungen mit verminderten Festigkeiten

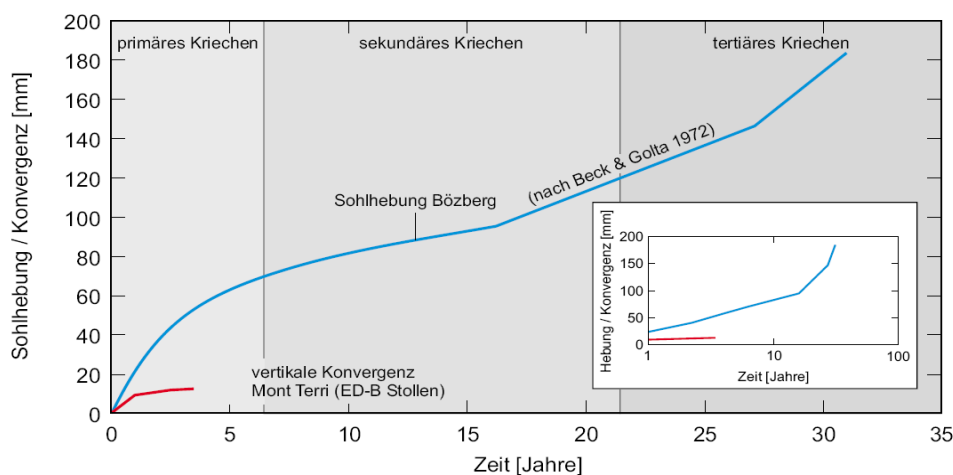
Im Modellgebiet Nord-1 kommt es durch die Annahme vermindelter Festigkeiten im Wirtsgestein (siehe Tabelle A-6) zu keiner erkennbaren zusätzlichen Plastifizierung aufgrund der Auffahrung. Demzufolge ergeben sich auch keine Veränderungen für spätere Betrachtungszeiten.

Die Veränderung durch Annahme vermindelter Festigkeiten (Tabelle A-5) im Modellgebiet Süd-1 sind deutlicher. Zusätzliche Gebirgsbereiche plastifizieren und nach dem Stellen des Ausbaus werden Spannungen bis ca. 70 MPa in der Betonschale ausgewiesen. Bei Betrachtung der Zeiträume von 5 Jahren und länger wird die mechanische Auswirkung einer größeren plastischen Zone um den Ausbau deutlich. Insgesamt werden im Modell größere Druckspannungen und geringere Biegemomente bei Annahme verminderte Festigkeiten berechnet. Die Belastungssituation stellt eine Überbeanspruchung der Betonschale dar.

## 6.4 Ergänzende Betrachtungen zum Konvergenzverhalten von Strecken im Opalinuston

Die durchgeführten Berechnungen stellen beispielhaft Möglichkeiten des Zusammenwirkens von Gebirge und Ausbau dar, welche durch die Vielzahl der Einflussfaktoren sehr komplex sind. Um beispielsweise geringere Spannungen im Ausbau zu erzielen, müssen Gebirgskonvergenzen in gewissem Maße zugelassen werden. In der Realität werden oftmals größere Konvergenzen akzeptiert, kontrolliert und ggf. das Sicherungssystem angepasst.

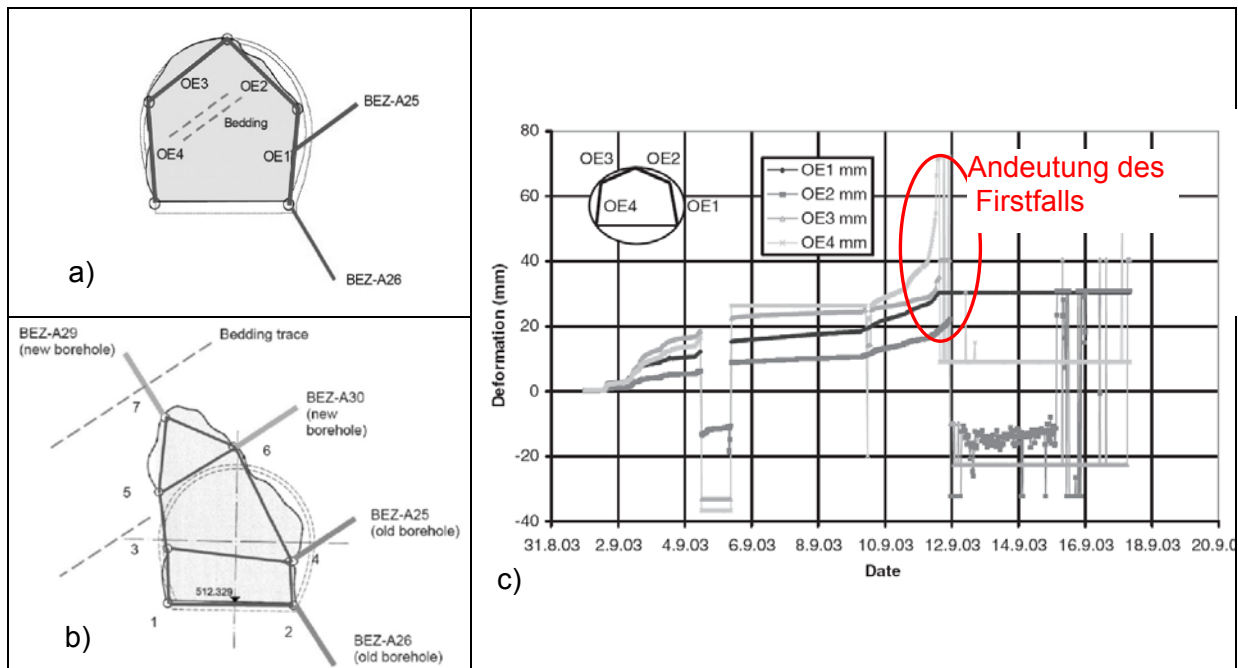
Abbildung 6-34 zeigt Sohlhebungen im Eisenbahntunnel Bözberg (Opalinuston) und Konvergenzen des Felslabors Mt. Terri (Opalinuston). Die Messungen über einen Zeitraum von ca. 30 Jahre zeigen im Eisenbahntunnel Bözberg fast 20 cm Sohlhebung. Die gemessenen Konvergenzen in Mt. Terri (ED-B-Stollen) von ca. 1 cm sind weitaus geringer, was möglicherweise auf andere Wasserzuflussbedingungen als im Eisenbahntunnel Bözberg zurückzuführen ist (NAGRA 2002).



**Abbildung 6-34: Vergleich der Sohlhebung im Eisenbahntunnel Bözberg mit den beobachteten vertikalen Konvergenzen im Felslabor Mt. Terri (NAGRA 2002)**

Am Beispiel eines Firstfalls in Mt. Terri (EZ-A Nische) wird der Zusammenhang zwischen gemessenen Konvergenzen und Verlust der Tragwirkung des Gebirges deutlich (Abbildung 6-35, VIETOR & BLÜMLING 2006). Die plötzlich stark ansteigenden Konvergenzen weisen schon Tage vorher auf einen möglichen Firstfall hin. Die Betriebssicherheit in Strecken durch entsprechende Streckenausbauten im Endlager ergibt sich letztendlich aus der genauen Kenntnis der örtlichen Bedingungen, einem angepassten Ausbau nach dem Stand der Tech-

nik und einem Messprogramm zur Kontrolle des Ausbaus (Spannungen, Verformungen). Berechnungen für generische Endlager sind als Abschätzung und zur Identifizierung zu erwartender Prozesse und Problem zu sehen, die im Rahmen einer Endlagerplanung zu behandeln sind.



**Abbildung 6-35: Beispiel Firstfall EZ-A-Nische in Mt. Terri**

a) Geometrie und Konvergenzmessung in der EZ-A-Nische im Ausgangszustand  
 (VIETOR & BLÜMLING 2006) b) Geometrie und Konvergenzmessung nach dem Firstfall  
 c) Deformationsentwicklung an der Tunneloberfläche

Einflussfaktoren für rheologisches Verhalten sind beispielsweise der Schwellwert (ab dem Kriechvorgänge beginnen), der Wassergehalt und die Temperatur. In NAGRA (2002) wurde beispielsweise für den Opalinuston im Zürcher Weinland ein Schwellwert von 7,5 MPa genannt. ZHANG et al. (2004) dagegen ermittelt in Laborversuchen (nicht nur für den Opalinuston), dass es wahrscheinlich keinen messbaren Schwellwert für das Kriechen von Tonstein gibt. Es zeigt sich, dass hier Forschungsbedarf vorhanden ist, was das Materialverhalten und besonders das rheologische Verhalten von Tonstein angeht. Dies bedeutet für geplante Strecken im Tonstein ein Verstehen dieser Vorgänge und die Ermittlung konsistenter Materialparameter oder die Abdeckung von Unsicherheiten durch entsprechende Sicherheitsfaktoren bei der Dimensionierung des Ausbaus. Die notwendige Standzeit von Strecken spielt dabei ebenfalls eine große Rolle. Ausgehend von den Erfahrungen sollten Modellierungen von Tonstein für diese Fragestellung folgendes beinhalten:

- Anisotropes Steifigkeitsverhalten
- Versagens- und Schädigungskriterium (anisotrop und abhängig vom Wassergehalt)
- Entfestigung und Verfestigung (softening, hardening)
- Hydraulische Kopplung
- Thermische Kopplung
- Rheologisches Verhalten

Die Kopplung dieser einzelnen Vorgänge sollte dabei so direkt wie möglich über nachgewiesene physikalische Vorgänge erfolgen und anhand standortspezifischer Materialkennwerte kalibriert werden. Es wird darauf hingewiesen, dass Simulationen von rheologischem Verhalten und bestehende hydromechanische Kopplungen für untersuchte, endlagerwürdige Tonsteine nicht befriedigend sind (TE KAMP et al 2006, BARNICHON et al. 2006).

## 7 WEITERE BETRACHTUNGEN ZU DEN GENERISCHEN MODELLEN

Es wurden folgende weitere Betrachtungen zu einzelnen Modellgebieten angestellt:

- Abschätzung der Hebungen an der Tagesoberfläche
- Temperaturerhöhung von Grundwasserleitern
- Aufbau des Grubengebäudes

### 7.1 Hebungsberechnungen

In diesem Abschnitt erfolgt eine Abschätzung der Hebungen an der Tagesoberfläche infolge der Wärmeentwicklung der Einlagerungsbehälter. Die Geometrien basieren auf den Ergebnissen der thermischen Auslegungsberechnungen in Kapitel 4. Es wird die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen für die Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 betrachtet. Das verwendete Viertelmodell ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Die Modelle beinhalten den geologischen Aufbau entsprechend Kapitel 2.

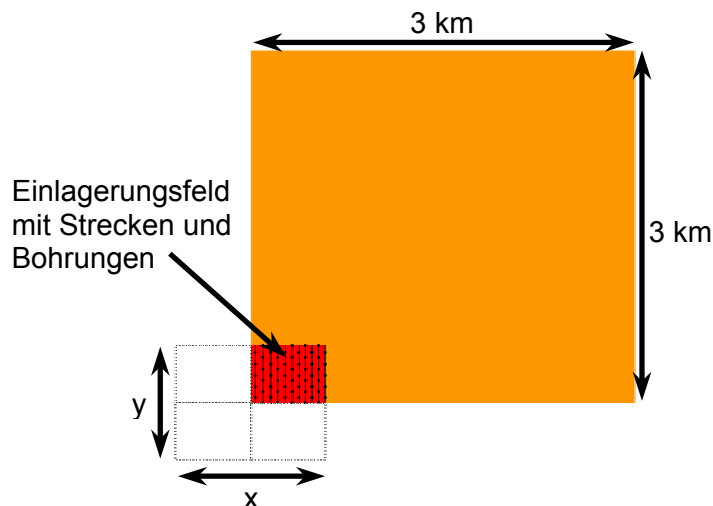


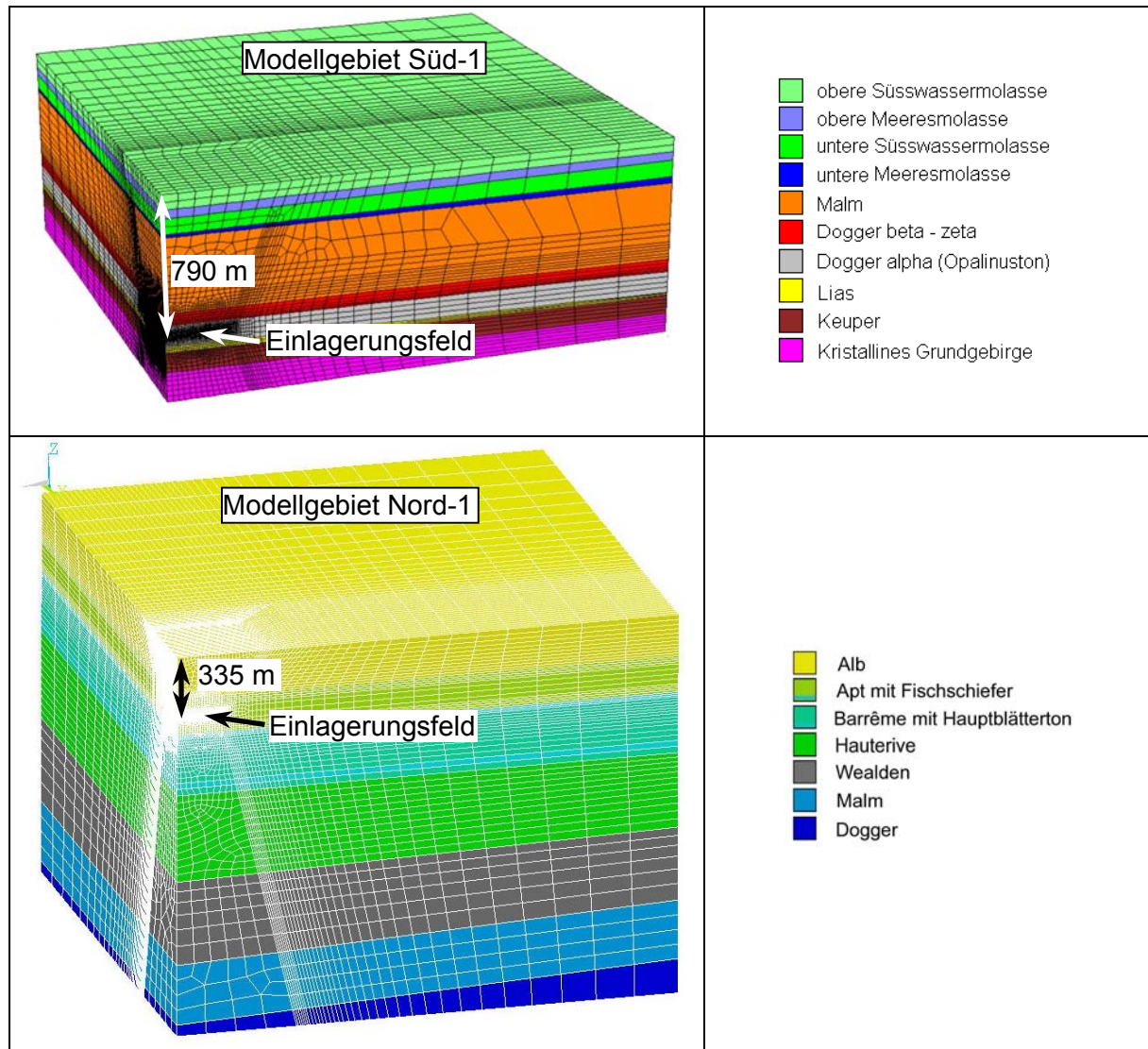
Abbildung 7-1: Viertelmodell zur Bestimmung der Hebungen infolge der Wärmeentwicklung, Grundriss, schematisch

Folgende Einlagerungsvarianten wurden betrachtet:

Tabelle 7-1: Betrachtete Einlagerungsvarianten für die Hebungsberechnungen

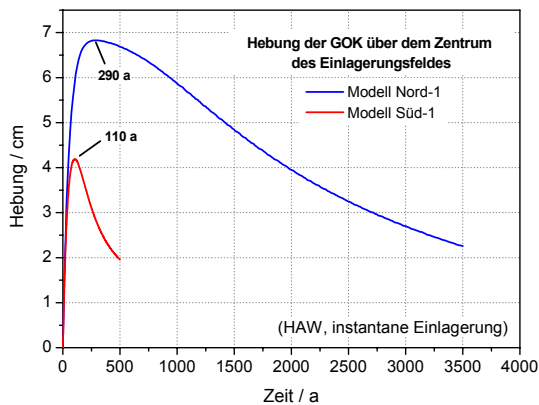
Variante	Zwischenlagerzeit [a]	Behälter pro Bohrloch	Bohrlochabstand [m]	Größe des Einlagerungsfeldes [km <sup>2</sup> ]
Modellgebiet Süd-1 <b>HAW gB</b>	38	6	30	0,63
Modellgebiet Nord-1 <b>HAW rB</b>	45	7	20	0,29

Abbildung 7-2 zeigt die verwendeten 3D-Modelle für die Hebungsberechnungen. Die verwendeten Materialparameter der einzelnen geologischen Schichten sind im Anhang aufgeführt.

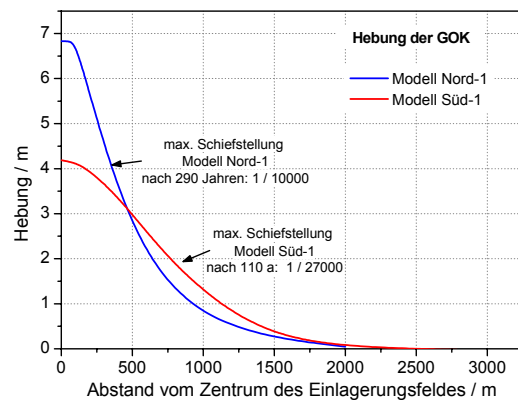


**Abbildung 7-2: Verwendete Modelle zur Hebungsberechnung, Modellgebiet Süd-1 und Nord-1**

Es werden nur die Ergebnisse von Berechnungen mit instantaner Einlagerung gezeigt. Die Ergebnisse aus SCHÖNEBECK et al. (2004) und UHLIG et al. (2006) zeigten nur marginale Unterschiede ( $< 3\%$ ) zu Berechnungen mit zeitlich gestaffelter Einlagerung in einem betrachteten Einlagerungsfeld. Die maximale Hebung im Modellgebiet Nord-1 beträgt ca. 7 cm, im Modellgebiet Süd-1 ca. 4 cm (Abbildung 7-3). Die Unterschiede ergeben sich aus der unterschiedlichen Tiefenlage der Modellgebiete. Die maximale Schiefstellung beträgt im Modellgebiet Nord-1 ca. 1:10000 und im Modellgebiet Süd-1 ca. 1:27000 (Abbildung 7-4). Diese Schiefstellungen sind deutlich kleiner als zulässige Grenzwerte für setzungempfindliche Maschinen (1:750) bzw. die Sicherheitsgrenze zur Vermeidung von Rissbildungen (1:500) (SCHNEIDER 1994).



**Abbildung 7-3:** Hebung der Tagesoberfläche GOK über dem Zentrum des Einlagerungsfeldes in Abhängigkeit der Zeit, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1



**Abbildung 7-4:** Schiefstellung der Tagesoberfläche GOK, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1

## 7.2 Temperaturerhöhung von Grundwasserleitern

Es erfolgte eine Abschätzung zur Temperaturerhöhung der Grundwasserleiter für die Modellgebiete Nord-1 und Süd-1. Entscheidend für die Betrachtung der Erwärmung möglicher Grundwasserleiter (GWL) sind vorwiegend über dem Endlager angeordnete hydraulisch wirksame Schichten, da der Großteil des Wärmetransports in Richtung Erdoberfläche geschieht. Der bestimmende Grundwasserleiter im Modellgebiet Süd-1 ist der Malmkarst (siehe Anlagenband Geologie), im Modellgebiet Nord-1 eine oberflächennahe Schicht im Alb.

### Oberflächennaher GWL im Modellgebiet Nord-1

Den Hauptgrundwasserleiter in diesem Gebiet bilden kiesige, vorwiegend saalezeitliche, untergeordnet auch elsterzeitliche, gut durchlässige Schmelzwassersande, die teilweise von Geschiebe- oder Auelehm bedeckt sind. Die durchschnittliche Mächtigkeit des oberen Grundwasserleiters beträgt ca. 20 bis 30 m. Es kommen örtlich jedoch auch erheblich größere Quartärmächtigkeiten vor (ca. 150 m) (DORN et al. 2004). Das verwendete Modell mit den verschiedenen geologischen Schichten ist in Abbildung 7-5 dargestellt. Die Entfernung des betrachteten Grundwasserleiters vom Einlagerungsfeld beträgt ca. 300 m (Abbildung 7-5).

### Malmkarst im Süddeutschen Molassebecken (Süd-1)

Im Malmkarst wurde nach Ergebnissen von IEP (2006) und STOBBER (1986) ein mittlerer Grundwasserdurchfluss von  $10^{-7}$  m/s abgeschätzt. Die Entfernung des Malmkarst zum Rand des Einlagerungsfeldes beträgt ca. 100 m (Abbildung 7-6). Es werden Mächtigkeiten des Grundwasserleiters zwischen 40 und 100 m angenommen. Das verwendete Modell mit den geologischen Schichten ist in Abbildung 7-7 dargestellt.

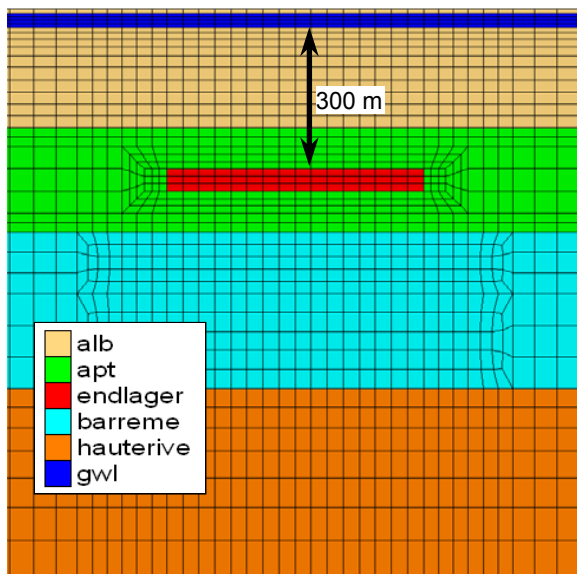


Abbildung 7-5: Lage des betrachteten Grundwasserleiters, Modell Nord-1

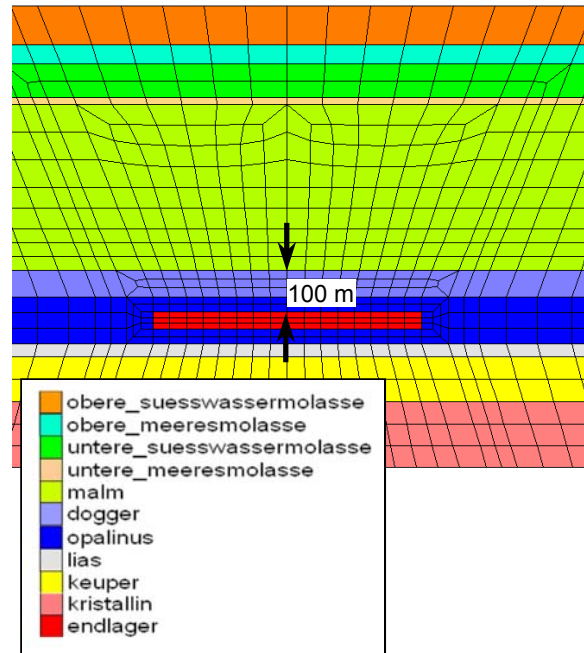


Abbildung 7-6: Lage des betrachteten Grundwasserleiters, Modell Süd-1

Die Abbildung 7-7 zeigt das verwendete numerische Modell zur Berechnung der Grundwassererwärmung im Modellgebiet Süd-1. Für das Modellgebiet Nord-1 wurde ein analoges numerisches Modell verwendet. Das Modell ist einseitig bis 10 km ausgedehnt um freien Raum für den Wärmefluss im Grundwasserleiter zu gewährleisten.

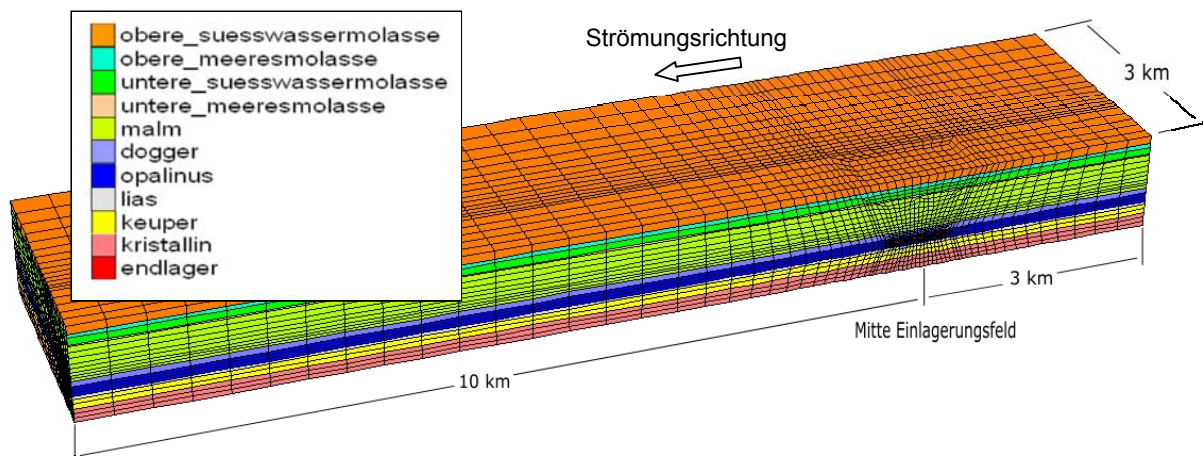


Abbildung 7-7: Modell zur Berechnung der Grundwasser-Erwärmung, Süd-1

Es wurden folgende Einlagerungsvarianten untersucht:

Tabelle 7-2: Daten des Einlagerungsfeldes

	Nord-1 HAW-gB	Süd-1 HAW-gB
Zwischenlagerzeit [a]	27	38
Behälter pro Bohrloch	13	6
Bohrlochabstand [m]	30	30
Gegebene Abfallmenge	4778 Behälter	4778 Behälter
Anzahl benötigter Bohrlöcher	368	797
Flächenbedarf [km <sup>2</sup> ]	0,29	0,63

In den Berechnungen wurde die Temperaturerhöhung an der Unterkante des jeweiligen Grundwasserleiters betrachtet (Abbildung 7-8). Hier tritt die maximale Temperaturerhöhung auf. Aufgrund der Überlagerung des konduktiven Wärmetransports im Gebirge und des konvektiven Wärmetransports durch die Grundwasserströmung muss der Ort des Temperaturmaximums nicht genau über dem Zentrum des Einlagerungsfeldes liegen (Abbildung 7-9).

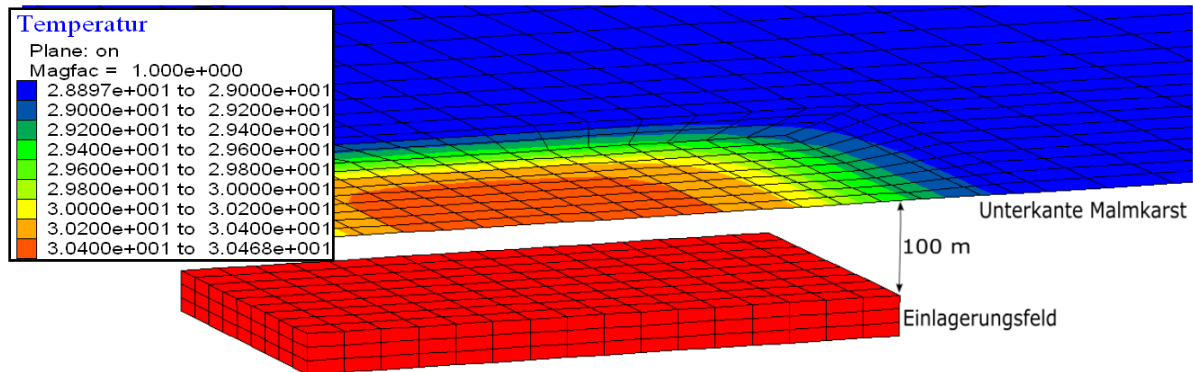


Abbildung 7-8: Einlagerungsfeld und Unterkante des Malmkarst, Modellgebiet Süd-1

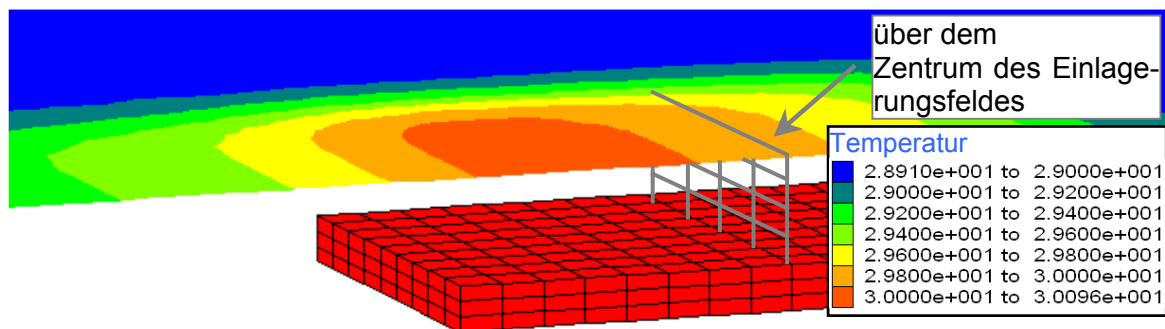


Abbildung 7-9: Durch Strömung versetztes Temperaturfeld, Modellgebiet Süd-1

Wird keine Grundwasserströmung angenommen, erfolgt die größte Temperaturerhöhung des Grundwasserleiters, da der Wärmetransport nur über Wärmeleitung erfolgt. Je schneller die Grundwasserströmung ist, desto mehr Wärme wird abgeführt.

Im Modellgebiet Süd-1 wurde der größte Temperaturanstieg in der geringsten vertikalen Entfernung zum Einlagerungsfeld mit 5,3 K an der Unterkante des Malm bestimmt (ohne Grundwasserbewegung). Die Temperaturerhöhung in der Mitte des Malmkarst beträgt ca. 3,4 K und die an der Oberkante ca. 2,8 K. Die Ausgangstemperatur ist nach einer Berechnungszeit von 1000 Jahren noch nicht wieder erreicht. Bei Annahme einer Grundwasserbewegung von  $10^{-7}$  m/s wurde eine maximale Temperaturerhöhung von 3,9 K ausgewiesen (siehe Abbildung 7-10).



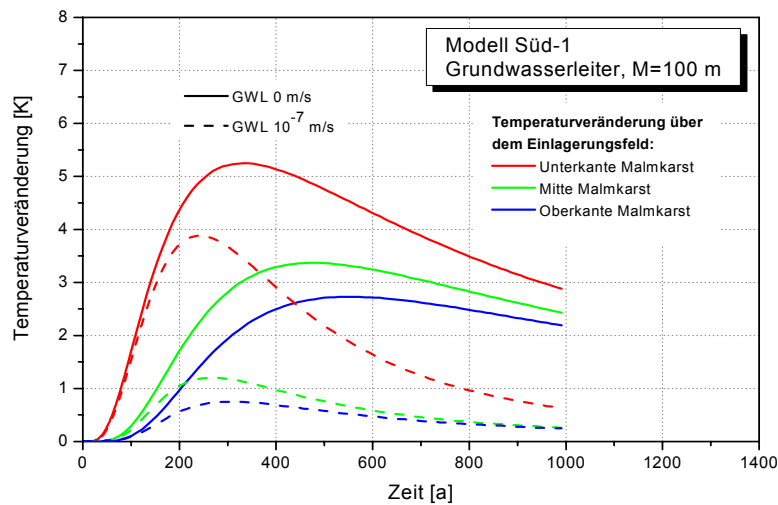


Abbildung 7-10: Temperaturen im GWL über dem Einlagerungsfeld, mit und ohne Strömung

Im Modellgebiet Süd-1 wurden verschiedene Variationsrechnungen durchgeführt. Die Grundwassergeschwindigkeit wurde zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-8}$  m/s variiert. Aufgrund der Unkenntnis der hydraulisch wirksamen Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurden einmal 40 m und einmal 100 m Grundwasserleitermächtigkeit angenommen. Die Zusammenfassung der Berechnungen zeigt Tabelle 7-3.

Im Modellgebiet Nord-1 befindet sich der betrachtete Grundwasserleiter in größerer Entfernung vom Einlagerungsfeld als im Modellgebiet Süd-1. Die Temperaturerhöhung im Grundwasserleiter ist daher geringer als im Modellgebiet Süd-1. Es wurden Berechnungen ohne Grundwasserströmung und mit  $10^{-7}$  m/s durchgeführt. Die maximale Temperaturerhöhung an der Unterkante des Grundwasserleiters beträgt 2,3 K.

Tabelle 7-3: Temperaturerhöhung im Grundwasserleiter, Zusammenfassung

Grundwasserfluss [m/s]	Maximale Temperaturerhöhung im GWL [k]		
	Modellgebiet Süd-1		Modellgebiet Nord-1
	GWL 100 m Mächtigkeit	GWL 40 m Mächtigkeit	GWL 30 m Mächtigkeit
0	5,3		2,3
$1 \cdot 10^{-8}$	4,9	5,1	-
$1 \cdot 10^{-7}$	3,9	4,5	1,2
$1 \cdot 10^{-6}$	2,0	2,0	-

### 7.3 Grubengebäudeplanung

Bei der Planung eines Grubengebäudes für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen liegen folgende Annahmen zugrunde (PÖHLER, 2006):

- Trennung in Überwachungs- und Kontrollbereich (gemäß Strahlenschutzverordnung)
- Frischwetterschacht = Förderschacht für das Haufwerk
- Abwetterschacht = Gebindetransportschacht

Das Grubengebäude ist grundsätzlich in einen Überwachungs- und Kontrollbereich unterteilt. Zum Kontrollbereich gehören alle Bereiche, welche für den Gebindetransport, die Einlage-

rung und mögliche kontaminierte Abwetter genutzt werden (Gebindetransportschacht, Gebindetransportstrecke, Einlagerungsstrecke, Abwetterstrecke). Alle anderen Grubenbereiche sind dem Überwachungsbereich zugeordnet.

Es darf zu keiner gegenseitigen Behinderung der Betriebsabläufe des Kontrollbereichs und des Überwachungsbereichs kommen. Auffahrungen vom Überwachungsbereich in den Kontrollbereich oder umgekehrt sind nicht vorteilhaft (Wetterteilkreisläufe). Diese Vorgaben bedeuten gewisse räumliche Trennungen und Maßnahmen für die Wetterführung.

Bei Annahme einer gewissen Bohrlochkonvergenz ist eine möglichst späte Fertigstellung der Bohrlöcher ggf. von Vorteil. Welche Offenhaltungszeiträume sich aus Bohrlochverformungen ergeben, wird im Rahmen von Betrachtungen zur Bohrlochstabilität in einem Anschlussvorhaben ermittelt. Im Folgenden werden zwei Varianten für mögliche Einlagerungsfelder schematisch dargestellt und erläutert - Variante 1 mit blinden Einlagerungsstrecken und Variante 2 mit durchschlägigen Einlagerungsstrecken.

### Variante 1

Abbildung 7-11 zeigt ein Zentralschachtsystem für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle. Im Gegensatz zum dezentralen Schachtsystem hat diese Anordnung den Vorteil, dass nur eine übertägige Anlage errichtet werden muss. Außerdem kann dadurch im Zuge der Erkundung bzw. Auffahrung flexibler auf Inhomogenitäten des Einlagerungshorizontes reagiert werden, so dass nicht zwingend der Bereich zwischen den Schächten genutzt werden muss. Die Einlagerung erfolgt in Blindstrecken, welche über eine Sonderbewetterung Frischluft erhalten. Kontroll- und Überwachungsbereich sind durch temporäre Absperrungen getrennt. Der Vorteil besteht in einer spätmöglichen Auffahrung der Einlagerungsstrecken im bereits für die Einlagerung genutzten Feld. Dadurch wird eine Parallelisierung von Auffahr- und Einlagerungsarbeiten möglich. Durch zwei Frischwetterstrecken und eine Abwetterstrecke sind Auffahrung und Gebindetransport stets im Frischwetterstrom möglich.

Bei dieser Variante ist es zwingend notwendig, eine Einlagerungsstrecke komplett vorzubereiten inklusive der Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher, da die Strecke immer vollständig vom Überwachungsbereich an den Kontrollbereich übergeben werden muss. Es ist daher aus jetziger Sicht anzunehmen, dass große Streckenlängen (z.B. >300 m) wenig geeignet sind, da viele Einlagerungsbohrlöcher im Vorfeld erstellt und offengehalten werden müssen. Genauere Aussagen zu möglichen Offenhaltungszeiträumen und damit sinnvollen Streckenlängen werden in Anschlussvorhaben erarbeitet.

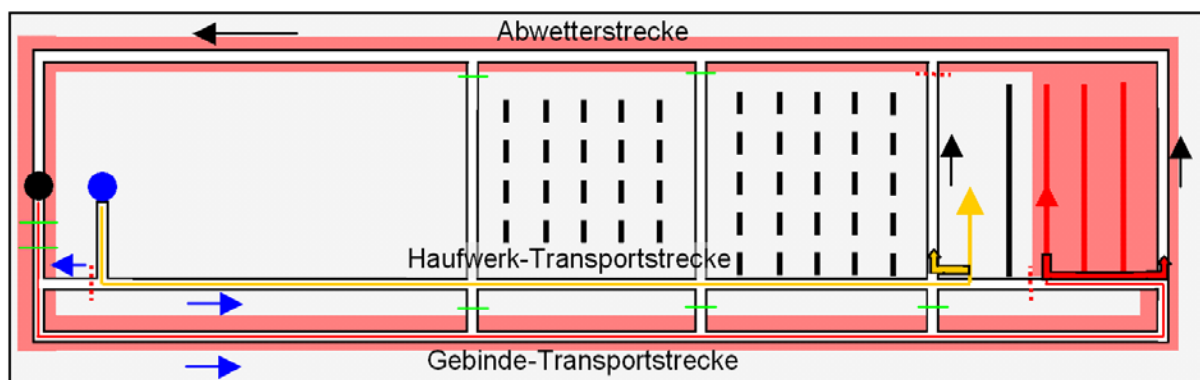


Abbildung 7-11: Grubengebäudeplanung, Variante 1, schematisch





## 8 VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER MODELLREGIONEN

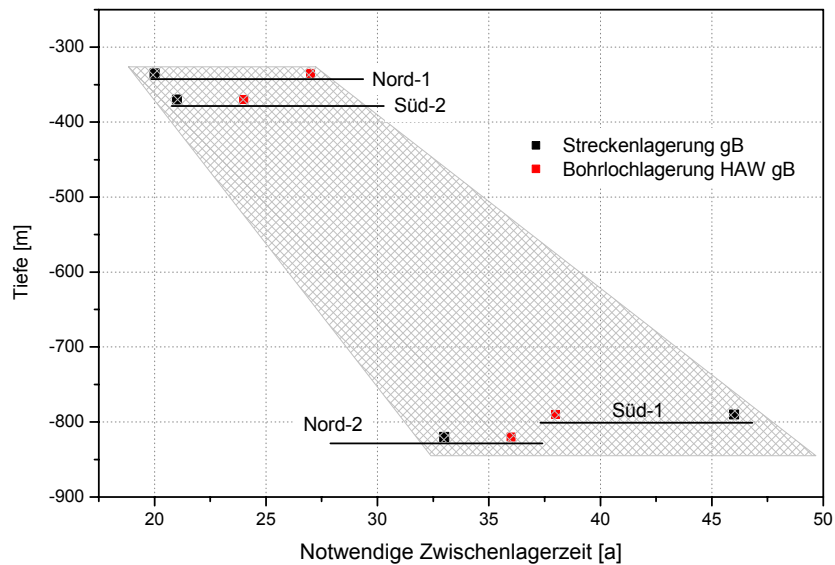
In dieser vergleichenden Bewertung werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Modellgebiete hinsichtlich ihrer geologischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften hervorgehoben. Trotz der verschiedenen möglichen Bewertungskriterien besteht das Ziel die Modellgebiete einem gewissen Ranking zu unterziehen.

### 8.1 Bewertung aus Sicht der geologische Situation

Alle Modellstandorte erfüllen die Mindestanforderungen des AkEnd. Der wissenschaftliche Kenntnisstand ist im Modellgebiet Nord-1 durch zahlreiche stratigraphische und sedimentologische Forschungsberichte zu den Unterkreide Sedimenten des Niedersächsischen Beckens und im Modellgebiet Süd-2 durch die geowissenschaftlichen Untersuchungen der NAGRA am Standort Benken im Vergleich zu den anderen Modellstandorten sehr hoch. Weniger günstig ist die geringere flächenmäßige Ausdehnung am Modellstandort Süd-2, bedingt durch die Lage im Grenzgebiet und zur Erdbebenzone 2. Sie lässt keine größere Flexibilität bei der näheren Standortauswahl zu. Darüber hinaus wird am Modellstandort Nord-1 positiv bewertet, dass ein durchgehendes, über 1.200 m mächtiges Tonprofil vorgefunden wurde. Die Einlagerungsschicht, der Hedbergellen-Mergel, ist ca. 200 m mächtig, weiträumig über mehrere hundert km<sup>2</sup> verbreitet und wird im Liegenden und Hangenden von Schichten mit hohen C<sub>org.</sub>- und Pyrit-Gehalten begleitet, die sich im Störfallszenarium als Diffusionssperren für die Radionuklidenausbreitung auszeichnen könnten. Für die Einlagerungsschicht, den Hedbergellen-Mergel, ist auf Grund der zu erwartenden höheren Festigkeit gegenüber Tonen eine gebirgsmechanisch günstige Situation zu erwarten. Die Schichtenfolge der Modelle Süd-1, Süd-2 und Nord-2 zeichnet sich durch eine hohe Variabilität an Gesteinen aus und enthält mehrere Grundwasserleiter.

### 8.2 Bewertung aus Sicht der thermischen Auslegung

Es wurden vier verschiedenen Referenzmodellgebiete in Deutschland zu den Konzepten Streckenlagerung und Bohrlochlagerung im Tonstein betrachtet. Hinsichtlich erforderlicher Zwischenlagerzeiten und des Raumbedarfs zeigen sich große Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellgebieten. Die Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich hat sehr großen Einfluss auf das thermische Gesamtsystem. Je geringer die Ausgangstemperatur ist, desto mehr thermische Leistung kann das umgebende Gebirge aufnehmen ohne Überschreitung der Auslegungstemperatur. Der zweite entscheidende Einflussfaktor ist die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gebirges, desto mehr Raum wird für die hinzugefügte Wärme genutzt und desto günstiger sind die thermischen Bedingungen für die Lagerung des radioaktiven Abfalls. Abbildung 8-1 zeigt die Tendenz der notwendigen Zwischenlagerzeit gegenüber der Tiefe des Einlagerungsbereichs an jeweils einem Beispiel zur Strecken- und Bohrlochlagerung. Es wird deutlich, dass die Modellgebiete Nord-1 und Süd-2 aufgrund ihrer geringen Tiefenlage *günstiger* für die Endlagerung als die Modellgebiete Nord-2 und Süd-1 sind. Der Flächenbedarf des Modellgebiets Nord-1 mit der geringsten Teufe beträgt bei Anwendung der Bohrlochlagerung ca. 2,3 km<sup>2</sup> und im Falle der Anwendung der Streckenlagerung zwischen 3,8 und 4,5 km<sup>2</sup>.



**Abbildung 8-1: Vergleich der Modellgebiete hinsichtlich ihre notwendigen Zwischenlagerzeiten**

Die berechneten Werte Zwischenlagerzeit, Behälterabstand und Streckenabstand dürfen nur in Verbindung miteinander gesehen werden. Sie stellen stets eine mögliche Kombination dar. Durch eine Erhöhung von Zwischenlagerzeiten kann der Flächenbedarf reduziert werden und umgekehrt.

### 8.3 Bewertung aus Sicht der Stabilitätsanalyse

Die Stabilitätsanalyse wurde für die Modellgebiete Nord-1 (-335 m) und Süd-1 (-790 m) durchgeführt. Dabei wurde auf die notwendigen Strecken und ihre Ausbauten für die Konzepte Bohrlochlagerung und Streckenlagerung eingegangen. Für die Strecke der Bohrlochlagerung mit hufeisenförmigem Querschnitt (7,30m Höhe) wurde eine bergmännische Auffahrung und 30 cm Spritzbeton zur Sicherung gewählt. Aufgrund des kreisrunden Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung (5,40m Höhe) wurde eine Auffahrung mittels Tunnelbohrmaschine (TBM) mit 30 cm Fertigbetonausbau gewählt. Die Ergebnisse sollten vergleichend innerhalb des gewählten Sicherungskonzepts gesehen werden. Es wurden Berechnungen mit Materialkennwerten aus der Literatur und zusätzlich zum Ausgleich von Unsicherheiten Berechnungen mit verminderten Festigkeitsparametern durchgeführt.

Die elastoplastischen Berechnungen zu den Strecken der Bohrlochlagerung weisen eine Überbeanspruchung des gewählten Ausbaus für das Modellgebiet Süd-1 aus. Im Streckenausbau (Bohrlochlagerung) des Modellgebiets Nord-1 ergaben sich Druckspannungen bis maximal 45 MPa. Der gewählte Ausbauquerschnitt bewirkt sehr große Biegemomente und Zugspannungen im Übergang Sohle-Stoß. Die zusätzlichen Belastungen für den Ausbau aufgrund der thermischen Wirkung betragen bis zu 10 MPa. Dies führt auch im Streckenausbau des Modellgebiet Nord-1 zu einer Überbeanspruchung einzelner Bereiche.

Eine nicht zu vernachlässigende Belastung entsteht durch die zeitabhängige Spannungsumlagerung im Gebirge (Kriechen). Der Abbau von Deviatorspannungen im Gebirge (verursacht durch die Auffahrung) führt zu einer zusätzlichen, zeitabhängigen Ausbaubelastung. In vereinfachten Modellansätzen wurde durch das Kriechen eine Verdreifachung der Druckspannungen gegenüber dem Zustand nach der Auffahrung ausgewiesen. Thermomechanisch-

hydraulisch gekoppelte Kriech-Berechnungen von LUX (2006b) zeigen eine Verdopplung der Spannung im Ausbau in einem Zeitraum von ca. 4 Jahren. Diese Ergebnisse von Kriechberechnungen stellen Abschätzungen nach dem derzeitigen Materialkenntnisstand dar. Hier soll vor allem der enorme Einfluss des Kriechens von Tonstein gezeigt werden.

Die numerischen Berechnungen zum TBM-Vortrieb für die Streckenlagerung sind ausführlich in BILLAUX (2006) dargestellt. Insgesamt entstehen geringere Belastungen für den 30 cm Tübbing-Ausbau als für den Ausbau im Bohrlochlagerungskonzept. Gründe dafür sind die andere Auffahrungsmethode, der geringere Querschnitt und die gleichmäßigere Belastung infolge des ideal kreisförmigen Querschnitts. Die Berechnungen wurden elastoplastisch mit thermischer Kopplung durchgeführt. Die größten Unterschiede ergeben sich aus den unterschiedlichen Teufen der beiden betrachteten Modellgebiete (Nord-1 und Süd-1). Im Modellgebiet Süd-1 werden bereits nach der Auffahrung vereinzelt Druckspannungen bis 60 MPa ausgewiesen, im Modellgebiet Nord-1 dagegen nur 14 MPa. Innerhalb eines Zeitraums von 5 Jahren kommen thermisch induziert zusätzlich ca. 10-12 MPa an Druckspannung im Ausbau beider Modellgebiete hinzu. Trotz einer sehr gleichmäßigen Belastung des Ausbaus aufgrund der erhöhten Plastizität des Tonsteins in der Umgebung der Auffahrung wird für jeden Zeitpunkt eine Überbeanspruchung der gewählten Betonschale im Modellgebiet Süd-1 ausgewiesen. Die Betonschale im Modellgebiet Nord-1 weist zu keinem Zeitpunkt eine Überbeanspruchung auf.

Im Modellgebiet Nord-1 entstehen verhältnismäßig große Biegemomente aufgrund der, besonders in horizontaler Richtung wirkenden, thermischen Ausdehnung des Gebirges. Eine vergleichmäßigende Druckverteilung im Ausbau findet aufgrund geringer Plastifizierung des umgebenden Gebirges im Modellgebiets Nord-1 nicht statt. Die thermische Ausdehnung bewirkt Zugspannungen bis 10 MPa. Diese Zugspannungen können durch entsprechende Bewehrung aufgenommen werden. Bei Betrachtung der Ergebnisse des TBM-Vortriebs muss beachtet werden, dass keine Kriechprozesse in die Berechnungen einbezogen wurden. Aufgrund der Ergebnisse zu den Strecken der Bohrlochlagerung ist auch hier mit einer deutlichen Zunahme der Ausbaubelastung durch Kriechvorgänge zu rechnen.

Die Stabilitätsanalysen zu Bohrloch- und Streckenlagerung zeigen eindeutig die Vorteile des Modellgebiets Nord-1 (-335 m) gegenüber dem Modellgebiet Süd-1 (-790 m). Die Tiefenlage wirkt sich direkt auf die Spannungen in Gebirge und Ausbau aus. Je geringer die Tiefenlage, desto einfacher und kostengünstiger ist die Auffahrung und der Ausbau von Strecken eines Endlagers.

#### **8.4 Abschließende Bewertung der Modellgebiete**

Die geologische Situation im Bereich des Modellgebiets Nord-1 hebt sich mit seinem bis zu 1.200 m mächtigen Tonprofil deutlich von den anderen betrachteten Gebieten ab. Der als potentieller Einlagerungshorizont gewählte 200 m mächtige Hedbergellen-Mergel ist weitläufig verbreitet und lässt eine vergleichsweise *günstigere* gebirgsmechanische Situation erwarten.

Aus thermischen Gesichtspunkten sind die Modellgebiete Nord-1 und Süd-2 als *günstig* zu bewerten. Aufgrund der größeren Tiefenlage und damit höheren Ausgangstemperaturen sind die Modellgebiete Süd-1 und Nord-2 *eher ungünstig* für die Endlagerung im Tonstein.

Das Modellgebiet Nord-1 wird aus der Sicht des Strecken-Stabilitätsanalyse *günstiger* angesehen als das Modellgebiet Süd-1.

Die thermisch induzierte, geringe Hebung und Senkung der Tagesoberfläche in den betrachteten Modellgebieten hat keinen Einfluss auf die Bewertung der Modellgebiete. Von Seiten einer möglichen Grundwassererwärmung ist das Modellgebiet Nord-1 aufgrund der größeren

Entfernung zum Grundwasserleiter *günstiger* als das Modellgebiet Süd-1. Da die Grubengebäudeplanung direkt an die Resultate der thermischen Auslegungsberechnungen gekoppelt ist, gilt hier das Gleiche, was aus thermischer Sicht genannt wurde. Zusätzlich haben die Modellgebieten Nord-1 und Süd-2 aufgrund ihrer geringeren Teufe gegenüber den Modellgebiet Süd-1 und Nord-2 erhebliche Vorteile hinsichtlich des Schachtabteufens.

Insgesamt sind die Modellgebiete Nord-1 und Süd-2 *günstiger* als die Modellgebiete Süd-1 und Nord-2. Bei Betrachtung des Modellgebiets Süd-2 muss auf dessen räumliche Begrenzung (keine Ausweichmöglichkeiten aufgrund der Landesgrenze zur Schweiz) sowie die Nähe zur Grenze der Erdbebenzone hingewiesen werden. Deshalb wird aufgrund der vorliegenden Resultate das Modellgebiet Nord-1 als das derzeit günstigste Gebiet angesehen.



## LITERATURVERZEICHNIS

- AKEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, W&S Druck, Köln.
- ANDRA (1999): Geological Statement Report of the Eastern Site. Report Nr. A RP ADS 99-00506/1999
- ANDRA (2003): Research on the disposal of Radioactive Waste - Report on Studies and Activities, Syntheses 2003
- Barnichon, J.D., Volckaert, G. (2006): Hydro-mechanical coupling in the Boom clay (MOL, Belgium) – Recent in situ observations, predictions and perspectives, SCK-CEN, Belgien
- Bausch, W. & Schober, T. (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 25.000 und Erläuterungen zum Blatt 8316/8416 Klettgau/Hohentengen am Hochrhein. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.
- Bel, J., Bernier, F. (2006): Temperature criterion related to the engineered barriers in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (vitrified waste or spent fuel), NIRAS/ONDRAF und EIG EURIDICE, Belgien
- Bernier, F., De Bruy, M., Demarcej, M., Verstricht, J. (2001): CLIPEX – 4. Annual Report, January 2000 December 2000, EC contract FI4W-CT96-0028, Euridice
- Bernier, F., Buyens, M., De Bruyn, D., Barnichon, J.D., Wemaere, I. De Craen, M., Volckaert, G., De Cannière, P., Brosemer, D. Van Cotthem A. & Ramaeckers, C. (2000): Natural and artificial discontinuities in Boom Clay
- BGL - Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg.) (1996): Erläuterung zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000, 4. Auflage, 329 S., München
- Binot, F., Gerling, P., Hiltmann, W., Kockel, F. & Wehner, H. (1993): The Petroleum System in the Lower Saxony Basin. In: Spencer A.M. (Ed.), Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons III. Spec. Publ. European Association of Petroleum Geoscientists No. 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 121 – 139.
- Blümling, P., Konietzky, H. (2003): Development of an excavation disturbed zone in clayston (Opalinus Clay), Geotechnical Measurements and Modelling
- Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland – Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik, Enke-Verlag, Stuttgart.
- Bredhoeft, J.D. & Papadopoulos, I.S. (1965): Rates of Vertical Groundwater Movement Estimated from the Earth's Thermal Profile, Water Resour. Res., 1, 325-328
- Buntebarth, G. (2005): Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften an Tonstein-Proben der Unterkreide, Geophysikalisch-technisches Büro, Clausthal-Zellerfeld
- Clauser, C., Höhne, F., Hartmann, A., Rath, V., Deetjen, H., Rühaak, W., Schellschmidt, R., Zschocke, A. (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe, RWTH Aachen, GGA Hannover, erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz

- Dereeper, B., Verstricht, J., De Bruyn, D., Moerkens, K., De Cannière, P., Kursten, B., Gens, R. (2001): PRAC-LAY Project - Mock-up Ophelie, ESV EURIDICE GIE report 01-230, Mol
- Dorn, M., Heinisch, M., Meyer, R., Reutter, E. (2004): Grundwasser – Bericht 2005, Anhang 2, Beschreibung der hydrologischen Teilräume im Koordinierungsraum Weser, NifB.
- Fabian, H.-J. (1971): Die Aufschlußbohrung Ellerburg Z1 bei Lübbecke in Westfalen, Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 18: 387-394, Krefeld.
- Filbert, W. (2004a): Gegebene Abfallmenge, mündliche Mitteilung, DBE Technology, Peine
- Filbert, W., (2004b): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Tongestein, DBE Technology GmbH, Peine
- Gaida, K.-H., Gedenk, R., Kemper, E., Michaelis, W., Scheuch, R., Schmitz, H.-H. & Zimmerle, W. (1981): Lithologische, mineralogische und organisch-geochemische Untersuchungen an Tonsteinen und Tonmergelsteinen der Unterkreide Nordwestdeutschlands, Geol. Jb., A 58, 15 – 47, 8 Abb., 2 Tab., 2 Taf., Hannover.
- GSF (Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH), Institut für Tieflagerung (1982): Eignungsprüfung der Schachanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht Band I (GSF – T 136).
- Hekel, U. (1989): Forschungsvorhaben Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien. - Zwischenbericht über die Voruntersuchungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Freiburg (unveröffentlicht) (Bibliothek BGR).
- Hofmann, F. (1981): Erläuterungen zum Blatt Nr. 74: Neunkirch. Geol. Atlas d. Schweiz. Schweiz. geol. Komm.
- Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M. & Krull, P. (2002a): Geowissenschaftliche Mindestanforderungen im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Überprüfung der Anwendbarkeit bei Tongesteinsvorkommen in Deutschland, BGR, Berlin.
- Hoth, P., Wirth, H., Schulz, P. & Krull, P. (2002b): Tonformationen in Deutschland als mögliche Barriere- oder Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, BGR, Hannover.
- Hoth, P. (2005): Mündliche Mitteilung, BGR, Berlin.
- Huertas, F., Farias, J. (2002): Projects EB, HE-B and VE. Mont Terri Rock Laboratory, European Commission, Luxembourg
- IEP - Innovative Energie für Pullach GmbH (2006): Informationen zu Geothermie im Malmkarst, [www.iep-pullach.de](http://www.iep-pullach.de).
- Itasca Consultants (2005): FLAC 3D 3.0 Handbücher, Minnesota USA
- Jing, L., Börgesson, L., Chijimatsu, M., Stephanson, O., Tsang, C-F., Kautsy, F. (1999): DECOVALEX II – Technical Report of Task 2C, Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI Report, vol. 23
- Jobmann, M. & Clauser, Ch. (1994): Heat advection versus conduction at the KTB: possible reasons for vertical variations in heat flow density, Geophys. J. Int. 119, 44-68.
- Jobmann, M., Amelung, P. (2003): Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein -Genesis- Jahresbericht 2003.

- Jockwer, N., Mieke, R., Müller-Lyda, I. (2000): Untersuchungen zum Zweiphasenfluß und diffusen Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen – Abschlußbericht, GRS Nr. 167
- Karnland, O.; Sandén, T. (2000): Long term test of buffer material at Aspo Hard Rock Laboratory, Source In MRS Symp. Proc. Vol. 608, 2000, Materials Research Society, pp. 173-178, Sweden
- Kemper, E. (1973): The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany, In: The Boreal Lower Cretaceous: the proceedings of an International organisation, vol. 5, 327 – 344, Liverpool.
- Kemper, E. & Zimmerle, W. (1978): Die anoxischen Sedimente der präoberaptischen Unterkreide NW-Deutschlands und ihr Paläogeographischer Rahmen, Geol. Jb., A 45, 3 – 41, 2 Abb., 1 Tab., 3 Taf., Hannover.
- Kemper, E. (1995): Sedimente, Fazies und Schichtenfolge des Barrême und Apt in NW-Deutschland, Geol. Jb., A 141, 9-45, 13 Abb., 4 Taf., Hannover.
- Kühn, V. (1994): Mineralogische Untersuchungen an Sedimenten der norddeutschen Unterkreide unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie sowie diagenetischer Bildungen, Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. (1969): Behavior of concrete under biaxial stresses. ACI Journal 66
- Leydecker, G. & Steinwachs, M. (1980): Das Erdbeben vom 2. Juni 1977 in der Norddeutschen Tiefebene bei Soltau, Geol. Jb., E 18: 18 S., 5 Abb., 3 Tab., Hannover.
- Lux, K.-H. (2005): Endlagerstandortsuche, Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht, TU Clausthal.
- Lux, K.-H., Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ Teil B, Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchung, Gutachten der TU Clausthal im Auftrag des AkEnd, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux et al. (2006a): Laborative und numerische Grundlagenuntersuchungen zur Übertragbarkeit von Stoffmodellansätzen und EDV-Software für Endlager im Salzgestein auf Endlager im Tonstein. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02 E 9632, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal.
- Lux et al. (2006b): THMC-Prozesse und numerische Simulationen. Entwurf-Vorlesungsunterlagen zum Masterstudiengang „Radioactive and Hazardous Waste Management“, Modul 3 Numerische Simulationen, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, – in Bearbeitung.
- Müller, E. (1995): Geochemische und sedimentologische Untersuchung der Grenzschichten Barrême-Apt unter besonderer Berücksichtigung der Laminite, Geol. Jb., A 141, 533 – 549, 3 Abb., 3 Tab., Hannover.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (1988): Technischer Bericht 86-01 – Sondierbohrung Weiach, Geologie Textband, Wettingen, Schweiz.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (2001): Technischer Bericht 00-01 – Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht, Wettingen, Schweiz.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (2002) : Technischer Bericht 02-03Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Wettingen, Schweiz.

- Pöhler, M. (2006): Entwicklung geeigneter untertägiger Grubengebäude für Tonsteinformationen im Rahmen des F+E-Vorhabens Erato, persönliche Mitteilung, DBE Technology, Peine
- Rachold, V. & Brumsack, H.-J. (1995): Geochemie von Unterkreide-Sedimenten (Barrême bis Apt) des niedersächsischen Beckens (unter besonderer Berücksichtigung des Unterapt-Fischschiefers), Geol. Jb., A 141, 551 – 561, 6 Abb., 1 Tab. I. Anh, Hannover
- Riedel, H. (1989): Schwermetallgehalte im Sedimentgestein (Braunjura a) als mögliche geogene Grundwasserbelastung. Diplomarbeit Universität Stuttgart - zitiert in: Schmidt 1996.
- Rullkötter, J., Littke, R., Heber, G., Horsfield, B., Jendrzewski, L., NotØ, H., Radke, M. & Schaefer, R.G. (1995): Organic Matter in Upper Barremian to Lower Aptian Sediments in the Lower Saxony Basin, NW Germany (Wiechendorf 1/86 Borehole), Geol. Jb., A 141, 563-585, 9 figs., 5 tabs., Hannover.
- Rutqvist, J., Börgesson, L., Chijimatsu, M., Nguyen, T.S., Jing, L., Noorishad, J., Tsang, C.-F. (2000): Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaiishi Mine – comparison of field results to predictions of four finite element codes, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, S. 129-142
- Schmidt, R. (1996): Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger  $\alpha$ ) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg. [Thesis] - Planetary Stratigraphy, Ser. E , 1: 110 S., 3 Taf., 15 Abb.; Tübingen.
- Schneider, K.J. (1994): Bautabellen für Ingenieure. 11. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf
- Schonebeck, M., Jobmann, M., Polster, M. (2004): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein -GENESIS-, Jahresbericht 2004, DBE Technology, Peine
- Schott, W., Jartzitz, W., Kockel, F., Sames, C. W., v. Stackelberg, V., Stets, J., Stoppel, D., Baldschuhn, R. & Krampke, K. D. (1967/69): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa. – 306 Kt., 1 Tab., Hannover. Hierzu Erläuterungen zum Paläogeographischen Atlas der Unterkreide von NW-Deutschland, S. 1 – 315, 18 Abb., Hannover.
- Stober, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen, Geologisches Jahrbuch Heft 42
- Te Kamp, L., Konietzky, H., Vietor, T. (2006): Hydro-mechanical behavior of the rock mass during the shaft sinking process: Predictions and measurements for the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, Vortrag beim Geomechanik-Kolloquium, Freiberg
- Vietor, T., Blümling, P., Armand, G. (2006): Failure mechanism of the Opalinus Clay underground excavations, aus EUROCK 2006 – Multiphysics Coupling and Long Term Behavior in Rock Mechanics, Van Cotthem et. al, NAGRA, Wettingen, Schweiz
- Walter, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart-Verlag, Stuttgart.
- Wehner, H. (1982): Die organische Geochemie der dunklen Tonsteine des nordwestdeutschen Ober-Apt und Unter Alb, Geol. Jb., A 65, 139 – 146, 4 Abb., 1 Tab., Hannover.
- Wittke, R. (1991): Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343m Sohle) (Bericht AI), Endlager Konrad Schachtverfüllung / Alte Bohrungen Bericht Teil AII, Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541m Sohle)

Zhang, C.L., Rothfuchs, T., Moog, H., Dittrich, J., Müller, J. (2004): Thermo-Hydro-Mechanical and Geomechanical Behavior of the Callovo-Oxfordian Argillite and the Opalinus Clay, Final Report, GRS 202

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 3-1:	A) Mineralogischer Stoffbestand des Opalinustons Süddeutschlands .....	18
Tabelle 5-1:	Überblick zu den thermischen Parametern der technischen Materialien .....	26
Tabelle 5-2:	Veränderung der Zwischenlagerzeiten .....	28
Tabelle 5-3:	Veränderung der Zwischenlagerzeiten, Referenzmodellgebiet Nord-1 .....	29
Tabelle 5-4:	Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte .....	30
Tabelle 5-5:	Ergebnisse der thermischen Berechnungen zur Bohrlochlagerung, 4 Modellgebiete .....	31
Tabelle 5-6:	Parametersatz zur Bestimmung des Streckenabstandes .....	34
Tabelle 5-7:	Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte .....	35
Tabelle 5-8:	Ergebnisse der thermischen Berechnung zur Streckenlagerung, 4 Modellgebiete .....	36
Tabelle 6-1:	In der Stabilitätsanalyse betrachtete Varianten zur Bohrlochlagerung .....	40
Tabelle 6-2:	In der Stabilitätsanalyse betrachtete Varianten zur Streckenlagerung .....	52
Tabelle 7-1:	Betrachtete Einlagerungsvarianten für die Hebungsberechnungen .....	60
Tabelle 7-2:	Daten des Einlagerungsfeldes .....	63
Tabelle 7-3:	Temperaturerhöhung im Grundwasserleiter, Zusammenfassung .....	65

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3-1:	Karte der untersuchungswürdigen Tonsteinformationen in Deutschland.....	6
Abbildung 3-2:	Temperaturverhältnisse in den 4 Modellgebieten .....	7
Abbildung 3-3:	Stratigraphisches Profil (4-fach überhöht) mit dem generischen Modell Nord-1 .....	8
Abbildung 3-4:	Stratigraphisches Profil mit dem generischen Modell Süd-1 im Gebiet um Ulm .....	9
Abbildung 3-5:	Generisches Modell Süd-2 im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Schweiz .....	10
Abbildung 3-6:	Generisches Modell Nord-2 im Raum zwischen Minden und Hameln .....	12
Abbildung 3-7:	Paläogeographische Situation des NSB zur Zeit des Hauterive .....	13
Abbildung 3-8:	Mächtigkeitsverteilung des Opalinustons in Süddeutschland .....	16
Abbildung 4-1:	Schema der Bohrlochlagerung .....	19
Abbildung 4-2:	HAW-Kokille .....	20
Abbildung 4-3:	Brenstabskokille (BSK-3).....	20
Abbildung 4-4:	Wärmeleistung der Behälter .....	21
Abbildung 4-5:	Varianten der Bohrlochlagerung .....	21
Abbildung 4-6:	Schema der Streckenlagerung .....	22
Abbildung 4-7:	POLLUX-10-DWR-U-BE Endlagerbehälter.....	22
Abbildung 4-8:	Schema der Streckenlagerung .....	23
Abbildung 4-9:	Wärmeleistung des POLLUX-3- Behälters .....	23
Abbildung 5-1:	Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen.....	24
Abbildung 5-2:	Modell des Einlagerungsfeldes, Bohrlochlagerung .....	27
Abbildung 5-3:	Diskretisierung im Behälterbereich .....	27
Abbildung 5-4:	Notwendige Zwischenlagerzeiten für das generische Referenzmodellgebiet Nord-1 .....	28
Abbildung 5-5:	Notwendige Behälterabstände für das generische Referenzmodellgebiet Nord-1 .....	29
Abbildung 5-6:	Notwendige Bohrlochabstände, Referenzmodellgebiet Nord-1 .....	30
Abbildung 5-7:	Modell des Einlagerungsfeldes bei Streckenlagerung .....	32
Abbildung 5-8:	Diskretisierung der Behälterumgebung .....	32
Abbildung 5-9:	Maximaltemperatur im Bentonit als Funktion der Zwischenlagerzeit .....	33
Abbildung 5-10:	Maximaltemperaturen im Bentonit in Abhängigkeit vom Behälterabstand d.....	34
Abbildung 5-11:	Maximaltemperatur im Bentonit in Abhängigkeit vom Streckenabstand .....	35
Abbildung 6-1:	Modellkalibrierung mit den Labordaten (Benken) für die Festigkeit.....	37
Abbildung 6-2:	Prinzip des verwendeten Stoffmodells.....	38
Abbildung 6-3:	Ergebnisse an Tongestein in Konrad aus Versuchen im Rahmenschergerät.....	38
Abbildung 6-4:	Modell zur Stabilitätsanalyse, Bohrlochlagerung .....	40
Abbildung 6-5:	Annahmen hinsichtlich der Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung des Betons.....	41
Abbildung 6-6:	Plastifizierung des Gebirges um die linke Strecke, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1, .....	41
Abbildung 6-7:	Druckspannungen im Ausbau der linken Strecke, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	42
Abbildung 6-8:	Verschiebungen des Ausbaus der linken Strecke, Modell Nord-1 .....	42
Abbildung 6-9:	Deviatorspannungen (Mises) der Wirtsgesteine nach der Auffahrung,.....	43
Abbildung 6-10:	Porenwasserdruck im Tonstein nach der Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	44
Abbildung 6-11:	Darstellung von Normalspannung und Biegemoment .....	44
Abbildung 6-12:	Biegemoment im Ausbau nach der Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1,.....	45
Abbildung 6-13:	Normalspannung im Ausbau nach der Auffahrung, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 .....	45
Abbildung 6-14:	Darstellung der Normalkräfte über den Biegemomenten, Modellgebiet Nord-1.....	46
Abbildung 6-15:	Plastifizierung des Gebirges um die linke Strecke, verminderte Festigkeiten, .....	46
Abbildung 6-16:	Kriechkurven von Opalinuston aus Mt. Terri.....	47
Abbildung 6-17:	Kriechberechnung mit Norton-Ansatz, Modellgebiet Süd-1 .....	48
Abbildung 6-18:	Kriechberechnung mit Norton-Ansatz, Modellgebiet Nord-1.....	48
Abbildung 6-19:	Maximale Spannung im Ausbau nach 1 und 4 Jahren, HOU/LUX-T-Stoffmodell, .....	49
Abbildung 6-20:	Spannungsentwicklung im Betonausbau für den Zeitraum von 4 Jahren .....	50
Abbildung 6-21:	Temperatur und Verschiebung nach 10 Jahren, Modell Süd-1.....	50
Abbildung 6-22:	Temperaturen im Ausbau nach 10 Jahren, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 .....	51
Abbildung 6-23:	Porenwasserdruckänderungen nach 10 Jahren, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1.....	51

Abbildung 6-24: Modell zur Stabilitätsanalyse bei Streckenlagerung, Grundriss .....	52
Abbildung 6-25: Modell zur Stabilitätsanalyse Streckenlagerung, Details .....	52
Abbildung 6-26: Darstellung der Tunnelbohrmaschine im Modell mit den Abmessungen .....	53
Abbildung 6-27: Verschiebungen durch die Auffahrung (x 300), Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	53
Abbildung 6-28: Plastifizierung durch die Auffahrung, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	54
Abbildung 6-29: Druckspannungen im Ausbau, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	54
Abbildung 6-30: Mises-Spannungen im Gebirge, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	55
Abbildung 6-31: Temperaturen im Ausbau nach 5 Jahren, Modellgebiet Nord-1 und Süd-1 .....	56
Abbildung 6-32: Biegemomente im Ausbau, nach der Auffahrung und nach 5 Jahren, .....	57
Abbildung 6-33: Normalkräfte über den Biegemomenten in der Betonschale, Modellgebiet Süd-1, Nord-1 .....	57
Abbildung 6-34: Vergleich der Sohlhebung im Eisenbahntunnel Bözberg .....	58
Abbildung 6-35: Beispiel Firstfall EZ-A-Nische in Mt. Terri .....	59
Abbildung 7-1: Viertelmodell zur Bestimmung der Hebungen infolge des Wärmeentwicklung, .....	60
Abbildung 7-2: Verwendete Modelle zur Hebungsberechnung, Modellgebiet Süd-1 und Nord-1 .....	61
Abbildung 7-3: Hebung der Tagesoberfläche GOK .....	62
Abbildung 7-4: Schiefstellung der Tagesoberfläche GOK, Modellgebiete Nord-1 und Süd-1 .....	62
Abbildung 7-5: Lage des betrachteten Grundwasserleiters, Modell Nord-1 .....	63
Abbildung 7-6: Lage des betrachteten Grundwasserleiters, Modell Süd-1 .....	63
Abbildung 7-7: Modell zur Berechnung der Grundwasser-Erwärmung, Süd-1 .....	63
Abbildung 7-8: Einlagerungsfeld und Unterkante des Malmkarst, Modellgebiet Süd-1 .....	64
Abbildung 7-9: Durch Strömung versetztes Temperaturfeld, Modellgebiet Süd-1 .....	64
Abbildung 7-10: Temperaturen im GWL über dem Einlagerungsfeld, mit und ohne Strömung .....	65
Abbildung 7-11: Grubengebäudeplanung, Variante 1, schematisch .....	66
Abbildung 7-12: Grubengebäudeplanung, Variante 2a mit durchgehender Bewetterung, Schema .....	67
Abbildung 7-13: Grubengebäudeplanung, Variante 2b mit Sonderbewetterung .....	68
Abbildung 8-1: Vergleich der Modellgebiete hinsichtlich ihre notwendigen Zwischenlagerzeiten .....	70



## ANHANG

**Tabelle A-1: Parameter des Opalinustons (Benken) für ein bilineares und ein lineares Mohr-Coulomb-Modell (nach NAGRA 2002)**

Festigkeitsparameter		Bilineares Modell		Lineares Modell	
		Matrixparameter	Schichtungsparameter	Matrixparameter	Schichtungsparameter
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2520			
Elastizitätsmodul	[MPa]	7000			
Poissonzahl	[-]	0,27			
Zugfestigkeit	[MPa]	2,5	1,2	2,5	1,2
Spitzenkohäsion	[MPa]	8,7 / 17,2 *	1,3 / 10,1 *	8,6	1,9
Reibungswinkel	[°]	30 / 14 *	34 / 12 *	24,6	24,1
Restkohäsion	[MPa]	4,3 / 16 *	0,7 / 5 *	4,3	1
Restreibungswinkel	[°]	29 / 13 *	33 / 11 *	24	22

\* Werte bei geringer Normalspannung / Werte bei hoher Normalspannung (siehe Abbildung 6-1)

**Tabelle A-2: Thermische Parameter für das Wirtsgestein im Modell Süd-1**

Parameter		Wert
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[1/K]	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Wärmeleitfähigkeit horizontal	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	2,45
Wärmeleitfähigkeit vertikal	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1,3
Spez. Wärmekapazität	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	800

**Tabelle A-3: Mechanische Parameter für das Wirtsgestein im Modell Nord-1**

Festigkeitsparameter		Matrixparameter	Schichtungsparameter
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2520	
Elastizitätsmodul	[MPa]	4000	
Poissonzahl	[-]	0,35	
Zugfestigkeit	[MPa]	3,1	1,5
Spitzenkohäsion	[MPa]	8,6	6,4
Reibungswinkel	[°]	30,8	24,9
Restkohäsion	[MPa]	2,4	1,85
Restreibungswinkel	[°]	23	19,1

**Tabelle A-4: Thermische Parameter für das Wirtsgestein im Modell Nord-1**

Parameter		Wert
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[1/K]	$2,8 \cdot 10^{-5}$
Wärmeleitfähigkeit horizontal	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	2,41
Wärmeleitfähigkeit vertikal	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1,65
Spez. Wärmekapazität	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1400

**Tabelle A-5: Abgeminderte Festigkeitsparameter des Opalinustons (Benken) für ein bilineares und ein lineares Mohr-Coulomb- Modell (nach NAGRA 2002)**

Festigkeitsparameter		Bilineares Modell		Lineares Modell	
		Matrixparameter	Schichtungsparameter	Matrixparameter	Schichtungsparameter
Zugfestigkeit	[MPa]	1,75	0,8	1,75	0,8
Spitzenkohäsion	[MPa]	6,1 / 12,0 *	0,9 / 7,1 *	6,0	1,3
Reibungswinkel	[°]	24,8 / 11,3 *	28,4 / 9,7 *	20,1	19,7
Restkohäsion	[MPa]	3,0 / 11,7 *	0,5 / 3,5 *	3,0	0,7
Restreibungswinkel	[°]	23,9 / 10,5 *	27,5 / 8,8	19,6	17,9

\* Werte bei geringer Normalspannung / Werte bei hoher Normalspannung (siehe Abbildung 6-1)

**Tabelle A-6: Abgeminderte Festigkeitsparameter für das Wirtsgestein im Modell Nord-1**

Festigkeitsparameter		Matrixparameter	Schichtungsparameter
Zugfestigkeit	[MPa]	2,2	1,0
Spitzenkohäsion	[MPa]	6,0	4,5
Reibungswinkel	[°]	25,5	20,4
Restkohäsion	[MPa]	1,7	1,3
Restreibungswinkel	[°]	18,8	15,5

**Tabelle A-7: Thermische Parameter der geologischen Schichten im Modellgebiet Nord-1 [UHLIG et al. 2006, BUNTEBARTH 2005]**

Modellgebiet Nord-1	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J / kg·K]	$\lambda_{II}$ [W / m·K]	$\lambda_I$ [W / m·K]
Alb	2 520	1405	1,95	1,38
Apt	2 520	1400	2,41	1,65
Fischschiefer	2 520	1400	2,41	1,65
Barrême	2 520	1429	2,27	1,49
Hauptblätterson	2520	1400	2,27	1,49
Hauterive	2 520	1 400	2,12	1,46
Wealden	2 520	1400	2,41	1,65
Oberjura	2 520	1400	2,50	2,00
Mitteljura	2 520	1 400	2,50	2,00

**Tabelle A-8: Thermische Parameter der geologischen Schichten im Modellgebiet Süd-1**  
**[SCHONEBECK et al. 2004, CLAUSER et al. 2002, ANDRA 1999]**

	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J / kg·K]	$\lambda$ [W / m·K]
Obere Süßwassermolasse	2 463	1 000	2,83
Obere Meeresmolasse	2 527	1 130	3,00
Untere Süßwassermolasse	2 676	978	2,92
Untere Meeresmolasse	2 527	1 130	2,88
Malm	2 680	910	3,91
Dogger beta - zeta	2 275	1 060	2,75
Dogger alpha (Opalinuston)	2 520	800	$\lambda = \lambda(T)$
Lias	2 000	880	2,38
Keuper	2 462	1 070	2,46
Kristallines Grundgebirge	2 720	920	3,00

$\lambda_{\text{Wirtsgestein}} = 2,45 - 0,00588 \cdot T$  parallel  
 $\lambda_{\text{Wirtsgestein}} = 1,30 - 0,00588 \cdot T$  senkrecht  
 mit:  $T$ : Temperatur der Wirtsgesteins [°C]

**Tabelle A-9: Thermische Eigenschaften der Gesteine im Referenzmodell Nord-2**  
**(Min-Max-Abschätzung für Opalinuston, andere Werte abgeleitet von Modellgebiet Nord-1)**

	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J / kg·K]	$\lambda$ [W / m·K]
Quartär	2520	1000	1,5
Wealden	2520	1000	2,41 / 1,65 ( $\lambda_h / \lambda_v$ )
Malm	2520	1000	2,0
Dogger delta - zeta	2520	1000	max: 2,60 / 1,50 min: 1,75 / 0,83
Dogger alpha - gamma (Opalinuston)	2520	1000	max: 2,60 / 1,50 min: 1,75 / 0,83
Lias	2520	1000	2,0
Keuper	2520	1000	2,5
Muschelkalk	2520	1000	2,5
Buntsandstein	2520	1000	2,5
Zechstein	2600	840	3,2

**Tabelle A-10: Thermische Eigenschaften der Gesteine im Referenzmodell Süd-2**  
**(Opalinuston: NAGRA 2001, andere: Bohrung Weiach: NAGRA 1988)**

	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J / kg·K]	$\lambda$ [W / m·K]
Malm	2 670	910	2,8
Dogger gamma - zeta	2 510	1 060	2,2
Dogger alpha - beta (Opalinuston)	2520	920	2,6 / 1,5 ( $\lambda_h / \lambda_v$ )
Lias	2 510	880	2,1
Keuper	2670	1 070	4,0
Muschelkalk	2630	1070	3,3
Permo-Karbon	2 390	1000	3,1

**Tabelle A-11: Mechanische und thermische Parameter zur Stabilitätsanalyse Streckenlagerung**

Materialparameter		Pollux	Sand	Bentonit	Behälterauflager	Streckenverfüllung	Ausbau	TBM
Elastizitätsmodul	MPa	70000	200	200	3000	20	40,000	400000
Poissonzahl	-	0,27	0,3	0,45	0,45	0,3	0,2	0,2
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	7700	2000	2000	2000	1600	2200	7000
Wärmeleitfähigkeit	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	8	0,75	2,45	2,45	1,25	2	N/A
Spezifische Wärmekapazität	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	450	1,200	1,200	1,200	1,200	800	N/A
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	2 10 <sup>-5</sup>	N/A