

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch

Institut für Geowissenschaften
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Landgrafenstieg 3c
07743 Jena

T/F: 03641-823520

dienstl.: T: 03641-948660
F: 03641-948662

14. Juni 2002

Temperaturverträglichkeit der Gesteine - Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten -

Es werden Randbedingungen zur Planung eines Endlagers für radioaktive Abfälle hinsichtlich der Temperaturverträglichkeit von Gesteinen entwickelt. Die Ausarbeitung erfolgte im Auftrag der Arbeitsgruppe 'Kriterienentwicklung' (AG-Krit) des Arbeitskreises 'Auswahlverfahren Endlagerstandorte' (AKEnd) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Die numerischen Arbeiten wie auch die Abfassung des diesbezüglichen Teils dieses Berichtes (insbes. die Anfertigung der Abbildungen) wurden von meinem Mitarbeiter, Herrn Dr. Kasper Fischer, ausgeführt.

Der Bericht ist nach den folgenden Punkten gegliedert:

0. Zusammenfassung des Kriteriums
1. Einführung
 - 1.1 Vorgaben für diese Studie
 - 1.2 Umfang dieser Studie
2. Vorgaben aus der Literatur
 - 2.1 Arbeiten in anderen Ländern (Auswahl)
 - 2.2 Literatur aus der Mineralogie
 - 2.3 Material-Parameter aus der Literatur
3. Umfang der Bearbeitung
4. Gekoppelte Temperatur-Spannungsberechnung
 - 4.1 Modellaufbau und -annahmen
 - 4.2 Randbedingungen
 - 4.2.1 Angenommene Gesteinseigenschaften
 - 4.2.2 Angenommener Wärmeeintrag aus dem Eundlager
 - 4.3 Das Modell AR
 - 4.3.1 Deformationsentwicklung
 - 4.3.2 Temperaturentwicklung
 - 4.4.3 Spannungsentwicklung
 - 4.4 Das Modell PM
 - 4.4.1 Deformationsentwicklung
 - 4.4.2 Temperaturentwicklung
 - 4.4.3 Spannungsentwicklung
5. Ergebnisse und Konsequenzen der Modellierungen
6. Diskussion
7. Ableitung eines Kriteriums
8. Literatur

0 Zusammenfassung des Kriteriums

Bei der Ableitung eines Kriteriums sind zwei unterschiedliche Ansätze zu berücksichtigen, wodurch es kein einheitliches Kriterium geben kann, sondern nur eine Kombination von zwei Aussagen:

- Einerseits ist es günstig, wenn das Gestein möglichst hohe Temperaturen verträgt, ohne seine Eigenschaften zu verändern (*mineralogischer Ansatz*);
- Andererseits ist es günstig, wenn die Temperatur im Endlager unter 100°C bleibt, damit im Umfeld des Endlagers keine thermo-mechanischen Spannungen auftreten, die ihrerseits zu Brüchen führen und damit Wasserwegsamkeiten öffnen (*thermo-mechanischer Ansatz*).

Der mineralogische Ansatz gilt für Tonstein, aber auch für Granit, da dort durch die Verfüllung mit Bentonit als zusätzlicher technischer Barriere ein Material verwendet wird, das ähnliche Eigenschaften wie Tonstein aufweist. Somit kann der aus mineralogischer Sicht zu erwartende Vorteil der besseren Temperaturverträglichkeit von Granit gegenüber Tonstein nicht ausgenutzt werden.

Die Berechnungen zeigen, dass die Kopplung der Temperatur mit der Spannung nicht außer Acht gelassen werden darf. Im Bereich seitlich neben dem Endlager treten in Entfernungen von 500 m bis 2000 m starke Extensions-Deformationen auf, wodurch es zu Druckentlastungen kommt. Da gleichzeitig im selben Bereich starke Scherkräfte wirken, muss in diesen Bereichen mit dem Auftreten von Extensions-Brüchen gerechnet werden, wenn die Temperaturen im Endlager über 100°C ansteigen. Dies bedeutet, dass die Wärmebelastung unter einem Wert gehalten werden muss, der garantiert, dass die Temperaturen im Kontaktbereich zum Wirtsgestein unter 100°C bleiben. Die Temperaturspitzen im Umfeld des Endlagers werden in einem Zeitraum zwischen 100 Jahren und 10 000 Jahren auftreten.

Dies hat zur Konsequenz, dass die Ausdehnung des Endlagers und der Umfang der Einlagerung entsprechend aufeinander abgestimmt werden müssen. Die vorliegenden Modellrechnungen basieren auf einer Packungsdichte von 6000 m³ Endlager pro Kubikmeter Abfall. Damit umfasst das Endlager bei einem abgeschätzten Anfall von 24 000 m³ stark Wärme entwickelnder Abfälle etwa 144 Mio Kubikmeter; dann liegt bei einem Wärme-Eintrag von ca. 13 200 KW ein Wert von 0.1 Wm⁻³ vor. *Bereits bei diesem Wärme-Eintrag muss in den Randbereichen mit Scherbrüchen gerechnet werden.* Eine Verkleinerung des Endlager-Volumens würde die Wärmeproduktion konzentrieren, die Temperatur im Kontaktbereich und damit die Gefahr von Scherbrüchen durch Temperatur-Spannungen erhöhen.

Als Kriterium lässt sich demnach für Granit und Tonstein kurz formulieren:

Das Volumen des Endlagers muss gewährleisten, dass die mittlere Wärmeproduktion keinesfalls über 0.1 Wm⁻³ ansteigt, da sonst mit Temperaturen von über 100°C zu rechnen ist. Nur so können mineralogische Veränderungen vermieden und das Risiko thermo-mechanischer Brüche vermindert werden.

Weiterhin wird zur Verringerung von Spannungsmaxima im Bereich neben dem Endlager empfohlen, die besonders stark wärmeentwickelnden Abfall-Arten im Zentrum des Endlagers und die schwächer wärmeentwickelnden am Rande zu lagern.

1. Einführung

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte untersucht im Rahmen der Erarbeitung von Kriterien zur Identifizierung und (vergleichenden) Beurteilung von günstigen geologischen Gesamtsituationen für die sichere Endlagerung u.a. auch die Temperaturverträglichkeit der Gesteine, die vor allem als Wirtsgesteine in Frage kommen. Hierbei ist neben der Beurteilung der Wärmeableitung insbesondere der Frage nachzugehen, wie das Gestein auf die Wärmequelle reagiert und seine Eigenschaften durch die Aufheizung u.U. ändert. Hierdurch können einerseits chemische Reaktionen auftreten, die die Standfestigkeit der Einlagerungsbereiche beeinträchtigen könnten – was im Rahmen dieser Studie nicht untersucht wird –, andererseits kann es durch die thermo-mechanischen Belastung zu Brüchen kommen, die zu einer Öffnung von Wasserwegsamkeiten führen.

Diese Öffnung von Wasserwegsamkeiten würde zur Erhöhung der Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung und damit der Geschwindigkeit des advektiven Transports von aus dem Endlager freigesetzten Radionukliden in Richtung Biosphäre beitragen. Da eine günstige geologische Gesamtsituation u.a. auch durch das Vorhandensein von Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit gekennzeichnet ist, kommt damit der Beurteilung der Temperaturverträglichkeit eine besondere Bedeutung zu. Obwohl in der Literatur und in vielen Berichten bereits experimentelle Befunde und Ergebnisse von Modellierungen vorliegen, sind doch die Auswirkungen von Temperatureffekten schwierig einzuschätzen **und in ein Kriterium umzusetzen**.

Wegen ihrer Bedeutung für die Endlagersicherheit muss aber die Temperaturverträglichkeit der Gesteine möglichst frühzeitig bei der Standortauswahl und vor Planung des Endlagers Berücksichtigung finden. Damit müssen diese Eigenschaften zur Identifizierung ausreichend günstiger geologischer Gesamtsituationen und zur differenzierten Beurteilung unterschiedlicher Situationen im Rahmen der Standortauswahl für ein Endlager – auf wissenschaftlicher Basis – zur Ableitung eines möglichst quantitativen Kriteriums "Temperaturverträglichkeit" führen.

Schließlich sollte bei der Bearbeitung auch darauf geachtet werden, dass die Eigenschaften eines Gesteinstyps innerhalb einer charakteristischen Bandbreite liegen. Diese Bandbreite ist ebenfalls zu abzuschätzen, um Rückschlüsse aus dem Gesteinstyp (und deren Sicherheit) auf die Temperaturverträglichkeit zu gestatten.

Da es bereits sehr viele Untersuchungen zu den Eigenschaften und Reaktionen von Salz gibt, wurden in der vorliegenden Studie nur Kristallin und Sedimentgestein (Granit und Tonstein) berücksichtigt.

Diese vorliegende Bericht ist im Zusammenhang mit den beiden Studien von Lux und Mitarbeitern zu sehen, die sich mit der Formulierung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" und "Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten" befassen (Lux et al., 2002a; 2002b).

1.1 Vorgaben für diese Studie

Der Begriff **Temperaturverträglichkeit** bezeichnet das Vermögen eines Gesteins, hohe Temperaturen und Temperaturgradienten zu ertragen, ohne durch thermische Spannungen zu zerbrechen oder durch Freisetzung von Kristallwasser (Tonsteine) zu schrumpfen und damit das Hohlraumvolumen zu erhöhen. Zugleich sollten sich die Materialparameter möglichst wenig ändern (z.B. die Plastizität im Fall von Salz).

Demzufolge sind die wesentlichen Materialparameter neben der spezifischen Wärme und der Fähigkeit, Wärme zu leiten, die elastischen Moduli, die Viskosität / Plastizität sowie die Dichte und die Bruchfestigkeit. Diese Parameter können u.U. wiederum von der Temperatur abhängen. Desweiteren ist mit Anisotropie und mit Wechseln der Gesteinseigenschaften in einem zu betrachtenden Volumen zu rechnen. Dies erfordert eine dreidimensionale Modellierung.

Die möglichen Veränderungen des Hohlraumvolumens erhöhen das **durchflusswirksame Hohlraumvolumen** (auch effektives oder nutzbares Hohlraumvolumen), das den Anteil am Gesamtvolumen von Gesteinen umfasst, der für die Grundwasserbewegung zur

Verfügung steht. In einem Teil des Gesamtvolumens wird die Bewegung durch Adhäsion und Kapillarkräfte verhindert. Hohlräume mit sehr geringer Öffnungsweite (und/oder begrenzter Ausdehnung) stehen für die Grundwasserbewegung also nicht zur Verfügung.

Mit diesen Betrachtungen schließen sich die Untersuchungen zur Temperaturverträglichkeit an die Untersuchung zur *Quantifizierung von Wasserdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung* an. Hinsichtlich der diesbezüglichen Zusammenhänge wird auf parallele Projektstudien verwiesen.

1.2 Umfang dieser Studie

Im Rahmen dieser Studie war zunächst vorgesehen, die Temperaturverträglichkeit aller in Frage kommender Gesteine, Salz, Kristallin und Sedimentgestein, in kleinskaligen Modellen zu untersuchen. Es stellte sich aber schnell heraus, dass zunächst doch Modelle untersucht werden müssen, die das gesamte Umfeld eines Endlagers betreffen, damit die Randbedingungen für kleine Modelle (etwa 1 m³) abgeleitet werden können. Weiterhin sind die Eigenschaften von Salz in der Vergangenheit sehr gut untersucht worden und als bekannt voraus zu setzen, so dass auf eine Wiederholung derartiger Untersuchungen hier zunächst verzichtet werden soll.

In dieser Studie konzentrieren wir uns demnach auf die Untersuchung der Temperatur- und Spannungsausbreitung im Bereich eines Endlagers, für das die Randbedingungen (Angaben zur Wärmeleistung, Ablauf der Einlagerung, Umfang der einzulagernden Abfälle) dem Zwischenbericht des AKEnd entnommen werden konnten (AKEnd, 2001).

1.3 Randbedingungen

Diese Studie entstand parallel zu den beiden Studien von Lux und Mitarbeitern, die sich mit der Formulierung zu den Themen "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" und "Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten" befassen (Lux et al., 2002a; 2002b).

Desweiteren beruhen die Annahmen für die Wärmeproduktion der gesamten Wärmeproduktion aller hochradioaktiven Abfälle, die vermutlich innerhalb des Zeitraumes der aktiven Phase des Endlagers innerhalb Deutschlands anfallen werden, den Angaben aus dem Zwischenbericht des AKEnd (2001; Tab. 3-1). Dabei handelt es sich um ca. 24 000 m³ Abfall, die gemäß den Berichten von Engelmann et al. (1993a/b/c) in einem dort dimensionierten Endlager mit dem Volumen von etwa 144 x 10⁶ m³ eingelagert werden und damit insgesamt zu einer Wärmeproduktion von ca. 0.1 Wm⁻³ führen. Diese verteilt sich homogen innerhalb des Bereiches des Endlagers.

2. Vorgaben aus der Literatur

2.1 Arbeiten in anderen Ländern (Auswahl)

Die beiden untersuchten Gesteine, Kristallin und Sedimentgestein, werden in anderen Ländern als Wirtsgesteine bzw. als Barriere-Gesteine getestet. Es sind hier zu nennen:

Belgien: Bel & Bernier (2001) beschreiben die Probleme, die beim Verfüllen mit Materialien entstehen, die auf Ton basieren, wenn hohe Temperaturen auftreten. Dabei verweisen sie u.a. auf die Arbeit von Horseman & McEwen (1996), die Angaben zu den thermischen Randbedingungen für die Einlagerung von wärmeerzeugenden Materialien in Tonformationen machen.

Finnland: Der Report über die Endlagerung (Posiva Oy, 1999) setzt sich sehr intensiv mit allen Aspekten der Enlagerung auseinander, lediglich der Frage nach der Temperaturbelastung im Endlager wird nicht nachgegangen. Es wird nur erwähnt, dass die Kupfer-

Behälter dem schwedischen System entsprechend in vertikalen Bohrlöchern in Bentonit eingegossen werden sollen. Explizite Aussagen über die Temperatur-Annahmen sind nicht zu finden, nur der Hinweis auf die enge Kooperation mit Schweden (SKB).

Frankreich: Im Untergrund-Labor bei Bure sollen Tests zu den hydrogeologischen, geochemischen und mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden. Quantitative Angaben über bereits vorliegende Untersuchungen zur Temperatur-Belastung konnten jedoch nicht gefunden werden.

Japan: In dem sehr umfangreichen Report H12 (JNC, 1999) werden hinsichtlich der Temperatur keine eigenen Untersuchungen vorgestellt, sondern lediglich die Vorgaben wiederholt, nach der Temperaturen über 100°C vermieden werden müssen, um Probleme mit Füllmaterial zu vermeiden.

Schweden: Es wird das Endlager mangels anderer Alternativen zwar in Granit geplant, jedoch ist vorgesehen, die Behälter mit Bentonit einzuschließen. Daher wird das Problem der Veränderung des Bentonit bei hohen Temperaturen (Austrocknung, Schrumpfung, mineralische Umlagerung) angesprochen, weshalb eine Temperaturbelastung von über 100°C vermieden werden müsse (KASAM, 2001). Hierzu wird auf eine Arbeit von Oscarson et al. (1996) verwiesen, in der die Durchlässigkeit von defekten Bentonit-Dichtungen untersucht wird.

Schweiz: Hier werden zwei Standorte sowohl im Kristallin (Nordschweiz) als auch im Sediment (Standort Benken, Opalinuston im Zürcher Weinland) untersucht. Das Vorgehen und die Ergebnisse sind in einer ausführlichen Stellungnahme zusammen gestellt (Appel, 2001). Daraus wird deutlich, dass man sich dort hauptsächlich mit den Fragen nach der räumlichen Ausdehnung der Gesteinsformationen, deren tektonischer und seismischer Belastung, der Prognostizierbarkeit der zukünftigen Entwicklung und der Standsicherheit des Bergwerkes befasst hat.

In einer gemeinsamen Studie der NAGRA; Colenco und der GRS (herausgegeben vom BfS, 2001) werden thermische Effekte genannt, die einerseits zur Ausbreitung von Rissen (entlang sog. Embryonalklüfte) und in den Stollenauskleidungen führen können, und die sich auch in Schrumpfrissen durch die Austrocknung äußern. Als Ursache werden aber lediglich Änderungen des Porendruckes durch die Temperaturerhöhung angeführt.

USA: Neben dem Endlager im Salz (WIPP) in New Mexico werden in den Yucca Mountains, Nevada, Vorbereitungen für ein Endlager getroffen. Abgesehen von der Tatsache, dass diese Lokation durch andere Sachverhalte kaum geeignet erscheint (vulkanische und seismische Gefährdung), kann man hier sehen, wie in sehr lockeren Sedimenten vulkanischen Ursprungs Tests gefahren werden, die auch die Temperatur-Belastung betreffen. Die Fülle des Materials im Internet ist geradezu unübersichtlich; es konnte jedoch ein Bericht gefunden werden, der quantitative Angaben enthält: Das im Bericht der TRW (1999) genannte Ziel ist die Einhaltung einer Temperaturbegrenzung an den Stollenwänden von 96°C und an der Container-Oberfläche von weniger als 350°C. Hierzu wurden umfangreiche Modell-Untersuchungen unter der Annahme unterschiedlicher Wärmebelastungen durchgeführt (Dichte der Container-Anordnung).

In diesem Bericht geht man davon aus, dass die Container frei stehen und durch Belüftung gekühlt werden (Zitat: The pre-closure ventilation requirement for each performance confirmation (PC), cross-block, and stand-by drift is 19 m³/sec).

2.2 Literatur aus der Mineralogie

Die Frage nach der Temperaturverträglichkeit von geologischen Materialien wurde intensiv mit Herrn Prof. K. Heide vom Institut für Geowissenschaften erörtert. Herr Heide ist selbst Autor einer Monographie mit dem Titel *Dynamische und Thermische Analysenmethoden* (1979). Darin setzt sich der Autor bereits mit den stofflichen Eigenschaften von Festkörpern in Abhängigkeit von der Temperatur auseinander, wobei ein Schwerpunkt auf der

Untersuchung der Bildungsbedingung natürlicher Rohstoffe sowie der Synthese-Bedingungen alter und neuer Werkstoffe lag.

Er hebt hervor, dass die thermischen Eigenschaften einen Stoff in vielen Fällen genauso eindeutig charakterisieren, wie seine chemische Zusammensetzung. Allerdings weist Herr Heide darauf hin, dass im Wesentlichen reine Stoffe untersucht werden, weniger zusammen gesetzte Materialien, wie wir sie in geologischen Formationen vorfinden. *Hier liegt seiner Meinung nach noch ein erheblicher Forschungsbedarf.*

Diese Diskussion war für uns ebenfalls ein Grund, die mineralogischen Aspekte unserer Studie vorerst zurückzustellen und uns dafür mehr auf die Anwendung moderner numerischer Verfahren auf das Umfeld des Endlagers zu konzentrieren, um die Randbedingungen für derartige spätere Studien zu untersuchen.

Andererseits werden in den oben genannten Studien anderer Länder (Belgien: Bel & Bernier, 2001; Japan: Report H12, JNC, 1999; Schweden, KASAM, 2001; USA, TRW, 1999) recht pauschal Forderungen nach der Begrenzung der Kontakt-Temperatur mit dem Gebirge auf 95°C bis 100°C genannt. Hierbei handelt es sich offenbar um Berücksichtigung der Freisetzung von Kristallwasser bei Tonstein, wodurch dieser seine mineralogischen Eigenschaften ändert und u.U. durch Schrumpfung zur Rissbildung neigt, sowie um ähnliche Probleme, die beim Verfüllen mit Materialien entstehen, die auf Ton basieren, wenn hohe Temperaturen auftreten (Bentonit im Fall der Verfüllung von Zwischenräumen bei der Einlagerung von Containern im Granit).

Grundlagen für die Festlegung dieser Temperatur-Obergrenze lassen sich aus mineralogischen Arbeiten ableiten. Allerdings konzentriert sich die Literatur entweder auf die Genese von Tonmaterialien oder auf die wirtschaftliche Verwertung; im ersten Fall ist die Temperatur-Geschichte von Interesse, im zweiten die thermische Zersetzung von Tonmineralen beim Brennen, also bei besonders hohen Temperaturen. Andererseits weisen Müller-Vonmoos & Kohler (in: Jasmund & Lagely, 1993) im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle bereits darauf hin, dass *Bei der Lagerung in Tongesteinen (...) vor allem thermische Parameter zu beachten sind. Es können Reaktionen auftreten, die zu kristallchemischen Veränderungen führen. Ein Beispiel ist die Bildung von Smectit / Illit – Wechsellagerungen aus Smectit infolge erhöhter Temperaturbedingungen (...). Es ist auch mit der Freisetzung fluider und gasförmiger Phasen zu rechnen.* Diese Bildung und Umbildung wird von Jasmund (in: Jasmund & Lagely, 1993) detaillierter beschrieben, ohne aber auf das Problem der Temperaturen genauer einzugehen.

Meunier (in: Velde, Ed., 1995) beschreibt die hydrothermale Veränderung von Tonstein in der Umgebung von Wasseradern vulkanischer Systeme und damit die Veränderungen zwischen Smectit und Illit unter verschiedenen Bedingungen. Interessant ist auch hier der Hinweis auf vulkanische Umgebungen als natürliche Analoga für Barrieren bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Bouchet et al., 1988a/b).

Konkretere Angaben zu Temperaturen, an denen Veränderungen auftreten, macht Bruce (1984), der den Illit-Gehalt von mehreren Proben mit gemischt gelagertem Illit-Smectit in Sedimenten unterschiedlichen Alters untersucht hat. Dabei hat er den Illit-Gehalt mit der Temperatur der Umgebung korreliert: Im Temperaturbereich ab etwa 100°C bis 150°C steigt der Anteil von etwa 25% bis 40% auf 70% bis 80%. Generell findet er z.B. bei Sedimenten des Mississippi, dass die Diagenese des Illit bereits bei etwa 71°C beginnt, während dieser Prozess bei Sedimenten des Niger-Deltas erst bei etwa 150°C anfängt. Dabei wird Wasser aus dem Smectit ausgetrieben und gelangt in das Poren-System des umgebenden Schiefergesteins.

Köster & Schwertmann (in: Jasmund & Lagely, 1993) machen in ihrer Beschreibung einzelner Tonminerale ebenfalls sehr konkrete Angaben: Beispielsweise enthält der Halloysit aus der Kaolin-Gruppe eine Wasserschicht, die bereits bei 60°C vollständig ausgetrieben wird, wobei der Halloysit in Metahalloysit übergeht. Dieser Vorgang findet bereits bei P-T-Bedingungen an der Erdoberfläche statt. Weiterhin geben sie für das Aufheizen von Kaolin-Mineralen an, dass diese ab etwa 450°C das in der Struktur gebundene Wasser verlieren. Nach dieser Entwässerung rekristallisieren geordnete Kaolinite mit einer scharfen exothermen Reaktion zwischen 980°C und 1000°C. Weiterhin zeigen fehlgeordnete Kaolinite eine schwache endotherme Reaktion zwischen 80°C und 200°C, die von adsorptiv

gebundenem Wasser herrührt. Sie ergänzen die Angaben von Bruce (1984) für Smectit: Beim Erhitzen wird bis etwa 300°C das adsorptive gebundene Zwischenschicht-Wasser ausgetrieben; die weitere Abgabe von Wasser bis 800°C beruht auf dem Verlust der strukturell gebundenen Hydroxid-Gruppen. Aus Differential-Thermoanalysen von Montmorilloniten lassen sich drei endotherme Reaktionen im Bereich zwischen 20°C und 1000°C beobachten: Die erste erfolgt zwischen 50°C und 250°C, die zweite zwischen 400°C und 730°C und die dritte zwischen 760°C und 920°C. Dabei ist die erste endotherme Reaktion die bedeutendste; ihre Intensität hängt vom Hydratationszustand der adsorbierten Kationen ab.

Pearson & Small (1988) ergänzen diese Angaben hinsichtlich der Illit-Smectit Diagenese durch einen Vergleich mit Paläotemperaturen aus Bohrungen in der nördlichen Nordsee: Sie finden als mittlere Temperatur für das Verschwinden ungeordneter Illit-Smectit-Zusammensetzungen einen Wert von 93°C bei einer Schwankungsbreite von 80°C bis 100°C.

Diese letzte Angabe ist die schärfste, die in der Literatur auf eine entscheidende Grenze bei etwa 100°C hinweist – andere Angaben konnten nicht gefunden werden.

Ein anderer Aspekt wird von Lassabatiere et al. (1999) angesprochen: Es handelt sich um die Modellierung der Ton-Barriere zwischen Container und Gebirge, wobei für den Ton verschiedene Durchfeuchtungen angenommen werden. Hierdurch hat die Barriere unterschiedliche hydro-mechanische Eigenschaften. Für die numerische Modellierung wurden thermodynamische Modelle herangezogen und nicht-lineare poro-elastische und poro-elasto-plastische Rheologien, um die hydro-mechanische Kopplung zwischen Container und Gebirge zu untersuchen. Besonders weisen die Autoren auf die Probleme hin, die durch unterschiedlichen Fluid-Fluss entstehen, wenn die Verhältnisse in der Ton-Barriere zwischen gesättigt und ungesättigt wechseln. Der Einfluss von Temperatur- und Spannungsänderungen wurde nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Angaben zum Temperaturverhalten von Tonsteinen noch sehr unscharf sind. Besonders zu dem hier interessierenden Bereich der Temperatur sind keine eindeutigen Hinweise zu finden. Daher verfestigt sich der Eindruck, dass hier noch ein großer Forschungs-Bedarf besteht.

2.3 Material-Parameter aus der Literatur

Die zur quantitativen Beschreibung und Beurteilung der Temperaturverträglichkeit von Gesteinskörpern (in situ) einzusetzenden Messgrößen sind nur mit erheblichem technischen Aufwand zu bestimmen. Üblicherweise stützen sich daher die vorläufigen Beurteilungen der Temperaturverträglichkeit nicht auf Messergebnisse, sondern auf die erfahrungsbasierte Einschätzung anhand des Gesteinstyps. Diese Erfahrung beruht einerseits auf Laborexperimenten, Großversuchen (z.B. im Forschungsbergwerk Asse) und auf Modelluntersuchungen. Dadurch wird der Typ eines Gesteinskörpers als Indikator für dessen Temperaturverträglichkeit eingesetzt. Dabei wird angenommen, dass diese Eigenschaften bei verschiedenen Gesteinskörpern eines bestimmten Gesteinstyps erfahrungsgemäß innerhalb einer charakteristischen Bandbreite liegen. Die entsprechende Tabelle aus dem japanischen Report H12 (JNC, 1999) zeigt die großen Schwankungsbreiten und auch die sehr unterschiedliche Datenbasis.

Zudem sind die Daten zur Temperaturverträglichkeit mit unterschiedlicher Zielsetzung, mit unterschiedlichen Verfahren und unterschiedlichem technisch-wissenschaftlichem Standard erhoben worden. Messtechnische Qualität und Aussagekraft der zu einem Gesteinstyp vorliegenden Daten sind uneinheitlich. Erfahrungsbasierte Zuordnungen von Bandbreiten der Temperaturverträglichkeit zu bestimmten Gesteinstypen gehen auf Laborversuche und numerische Modellierungen zurück.

Weiterhin beziehen sich die Angaben im Wesentlichen auf zweidimensionale Betrachtungen der Wärmeausbreitung und berücksichtigen nicht die mögliche Temperaturabhängigkeit der physikalischen Parameter sowie den engen Zusammenhang mit der indizierten Spannung, also die thermo-mechanische Kopplung.

Die Integrität des kristallinen Gesteins wird vermutlich durch die Wärme-Belastung nicht in Frage gestellt; durch die Verwendung von Bentonit als Material zum Einschließen der Container wird aber die maximale Temperatur begrenzt und auf das Niveau von Tonstein herab gesetzt. Horseman & McEwen (1996) fassen die Problematik zusammen, indem sie darauf hinweisen, dass die thermische Phase nach einem Abschluss des Endlagers zwar von kurzer Dauer ist, jedoch die Effekte des Temperatur-Anstiegs und der zugehörigen thermischen Gradienten in einem tonhaltigen Wirtsgestein sehr umfassend sind. Sie beinhalten geomechanische Effekte auf das Gestein und die bergbaulichen Strukturen und Einbauten, Störungen des Grundwasser-Druckes und -Flusses, mögliche Nahfeld-Effekte auf die Transporteigenschaften und -mechanismen (z.B. gekoppelte Fließphänomene) sowie Einflüsse auf die chemische Entwicklung der nahen Umgebung. Die maximal tolerierbare Temperatur in einem Endlager ist sowohl durch die Eigenschaften des Wirtsgesteins als auch durch die der Füllmaterialien (Bentonit). Allerdings sei die Spezifikation dieser maximalen Temperatur immer noch problematisch.

Dabei wird betont, dass es noch viele Bereiche gibt, in denen Unsicherheit herrscht, u.a. die unvollständige Kenntnis der präzisen Mechanismen der Grundwasser-Bewegung in tonreichen Materialien und die möglichen Abweichungen vom Darcy-Gesetz, das Auftreten von vorübergehenden, sehr lang-periodischen Bewegungen, die Rolle der gekoppelten Fließphänomene sowie das Problem der Gas-Migration in der Formation des Wirtsgestein.

3. Umfang der Bearbeitung

Im Rahmen dieser Studie werden dreidimensionale numerische Modellrechnungen zur Temperaturbelastung der Umgebung eines Endlagers und der damit verbundenen induzierten Spannung durchgeführt. Hierzu werden zwei Modelle durchgerechnet, deren Materialparameter auf den umfangreichen japanischen Untersuchungen beruhen (H12-Studie, JNC, 1999). Die Materialien entsprechen Kristallin (crystalline rocks / acidic rocks, *Modell AR*) und pre-neogene Sedimente (mudstones, tuff, *Modell PM*).

Die ursprünglich beabsichtigten umfangreicheren Studien speziell zu den gesteinspezifischen Eigenschaften im Mikrobereich konnten aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden, da einerseits die Literatur doch nicht so umfangreich war wie erwartet, und da andererseits zunächst die Randbedingungen geklärt werden mussten. Allerdings lassen sich im Rahmen der durchgeführten Arbeiten Hinweise auf die Ausdehnung und den Wärme-Eintrag ableiten, die möglich sind, ohne dass die Integrität des Endlagers verletzt wird.

4. Gekoppelte Temperatur-Spannungsberechnung

4.1 Modellaufbau und -annahmen

Das zylindrische Modell (Abb. 4.1) hat einen Durchmesser von 20 km und eine Tiefenausdehnung von 5 km. In der Zylinderachse befindet sich im Tiefenbereich 870 m bis 1170 m ein quaderförmiger Bereich mit einer horizontalen Ausdehnung von 1600 m x 300 m, der einem Endlager entspricht. Die Längsachse des Endlagers liegt parallel zur Y-Achse des Modell, die Querachse parallel zur X-Achse.

Das gesamte Modell besteht aus 3960 Hexaeder-Elementen zweiter Ordnung mit insgesamt 18 194 Knoten. Damit ergeben sich 59 342 Freiheitsgrade. Für die Knoten an der Modellunterseite gilt die Einschränkung, dass sie sich nicht in vertikaler Richtung bewegen dürfen. Die Knoten am seitlichem Rand dürfen sich hingegen nicht horizontal bewegen. Alle anderen Knoten unterliegen keinen Einschränkungen in der Bewegung. Im gesamten Modell wirkt die Schwerkraft (9.81 ms^{-2}). Die Modelloberseite wird auf einer Temperatur von 10°C und die Unterseite auf 160°C gehalten. Dies entspricht einem Gradienten von 30 K/km . Der zeitliche Verlauf der Temperatur im Endlager und der Umgebung ergibt sich aus den thermischen Parametern (Tab. 4.1) des Gesteins und der Wärmeproduktion. Für die Modellierung wurde eine maximale Wärmeproduktion von 0.1 Wm^{-3} angenommen. Der angenommene Wärme-Eintrag wird in Kap. 4.2.2 abgeschätzt.

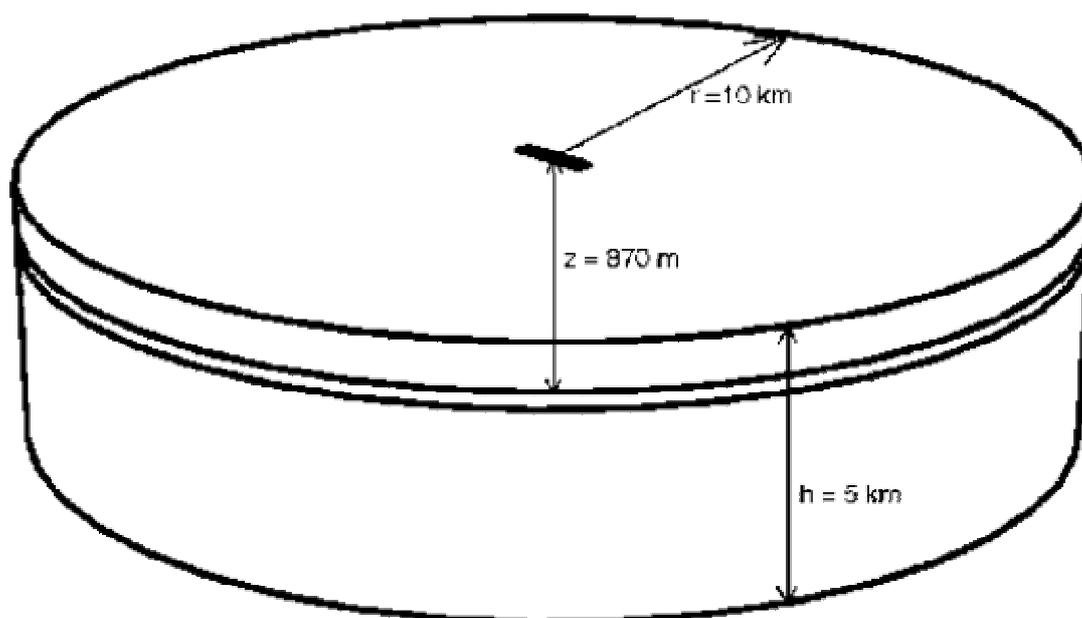


Figure 4.1: Skizze des Modellaufbaus

4.2 Randbedingungen

4.2.1 Angenommene Gesteinseigenschaften

Die Gesteinseigenschaften wurden aus dem Bericht JNC (1999) entnommen. Die für die Modellierung benutzten Werte sind in Tabelle 4.1 wiedergegeben. Die elastischen Eigenschaften werden durch den E-Modul (*Youngs-Modulus*) und dem Poisson-Verhältnis sowie der Dichte bestimmt. Das thermische Verhalten wird durch die Größen thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und linearer Ausdehnungskoeffizient beschrieben. Das anelastische Verhalten des Materials wird in der Modellierung durch Mohr-Coulombsches Bruchverhalten berücksichtigt. Dafür wurden die in JNC (1999) publizierten Werte der Kohäsion und innerer Reibungswinkel (*internal friction angle*) aus triaxialen Kompressionstest benutzt. Es wurde jeweils ein Modell für Granit (acidic crystalline rocks, Modell AR) und für Tonstein (pre-neogene mudstones, Modell PM) gerechnet.

Table 4.1: Die verwendeten Materialeigenschaften für die Modellierung aus JNC (1999). Es wurden die benutzten Median-Werte für crystalline rocks (acidic rocks, Modell AR) und pre-neogene sedimentary rocks (mudstones, tuff, Modell PM) verwendet.

	E	Poisson-	spez.	Thermische	spezifische	linearer	Kohäsion	innerer
	Modul	verhältnis	Dichte	Leitfähigkeit	Wärmekapazität	Ausdehnungs-		Reibungs-
						koeffizient		winkel
Modell	[Gpa]		[kgm^{-3}]	[$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	[$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	[10^{-5}K^{-1}]	[Mpa]	[$^{\circ}$]
AR	28,1	0,23	2650	2,76	1,03	1,18	13,2	40,0
PM	4,1	0,28	1980	1,37	0,85	1,36	1,1	26,0

4.2.2 Angenommener Wärmeeintrag aus dem Endlager

Die angenommene Wärmeproduktion entspricht der gesamten Wärmeproduktion aller hochradioaktiven Abfälle, die vermutlich innerhalb des Zeitraumes der aktiven Phase des Endlagers innerhalb Deutschlands anfallen (AKEND, 2001; Tab. 3-1). Dabei handelt es sich um ca. 24 000 m³ Abfall, die gemäß den Berichten von Engelmann et al. (1993a/b/c) in einem Endlager mit dem Volumen von etwa 144 x 10⁶ m³ eingelagert werden und damit zu einer Wärmeproduktion von ca. 0.1 Wm⁻³ führen. Diese verteilt sich homogen innerhalb des Bereiches des Endlagers.

Der zeitliche Verlauf der Temperatur im Endlager und der Umgebung ergibt sich aus den thermischen Parametern (Tab. 4.1) des Gesteins und der Wärmeproduktion. Bei der zugrunde gelegten maximalen Wärmeproduktion von 0.1 Wm⁻³ steigt die Wärmeproduktion im Endlager zunächst innerhalb 50 Jahren von 0 Wm⁻³ auf 0.1 Wm⁻³ linear an (Kaltphase) und fällt dann aufgrund der abklingenden Aktivität des Abfalls mit einer Halbwertszeit von 200 Jahren exponentiell ab (Warmphase). Der Verlauf ist in Abb. 4.2 gegeben. Die Wärmeproduktion von 0.1 Wm⁻³ ergibt sich aus dem bekannten gesamten Wärmeeintrag der vorhandenen und noch zu erwartenden Abfälle (Zwischenbericht des AKEnd, 2001; Poster K.-D. Closs zum Ein- oder Mehr-Endlager Konzept).

Für den Bereich des Endlagers im Tiefenbereich von 870 m bis 1170 m wird ein Quader der Ausdehnung 300 m in der Tiefe und 1600 m x 300 m horizontal angenommen. Dies entspricht einem Volumen von 144 Mio Kubikmetern, also einer Packungsdichte von einem Kubikmeter Abfall auf 6000 m³ Endlagervolumen.

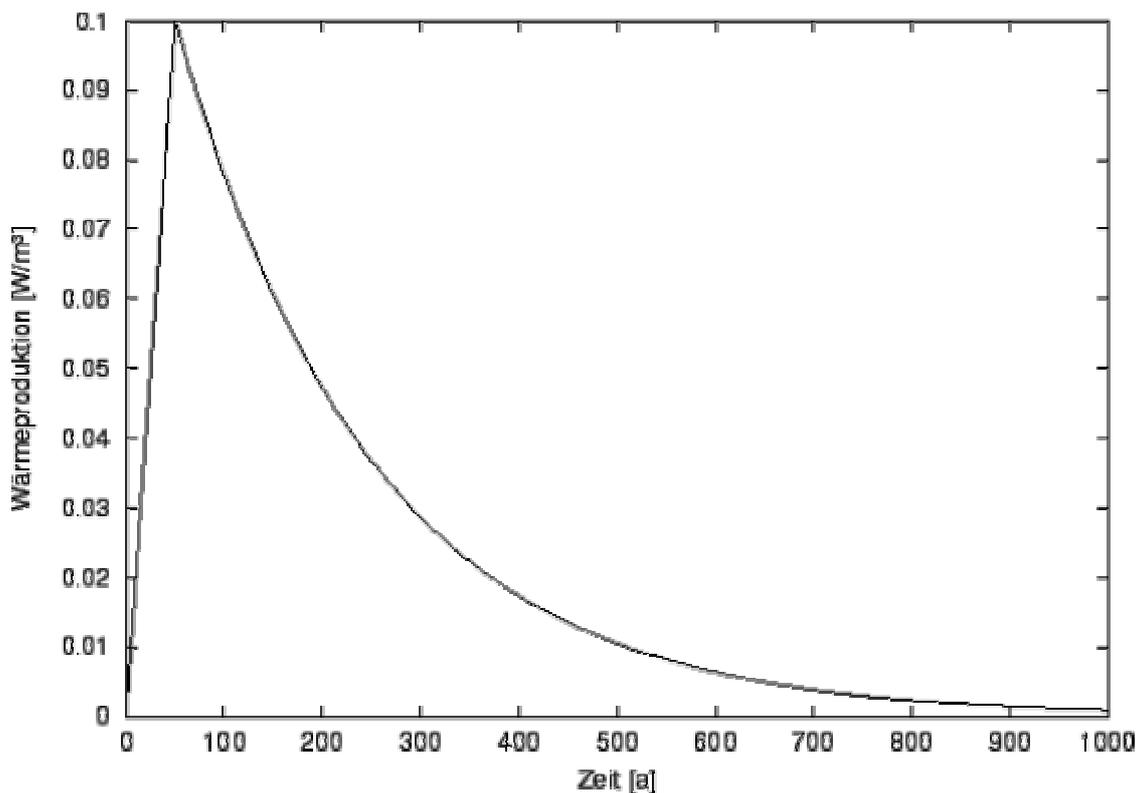


Figure 4.2: Zeitlicher Verlauf der Wärmeproduktion im Endlager

4.3 Das Modell AR

Das Modell AR berechnet die vollständig gekoppelte Spannungs- und Temperatur-Verteilung mit Gesteinseigenschaften eines homogenen Granits. Die folgenden Abschnitte geben sowohl den Temperaturverlauf als auch den Spannungsverlauf in der räumlichen und zeitlichen Entwicklung im Endlager und seiner Umgebung wieder. Dabei gilt den Veränderungen außerhalb des eigentlichen Endlagers besonderer Aufmerksamkeit.

4.3.1 Deformationsentwicklung

Die Gesamtdeformation für den Zustand nach 310 a nach Beginn der Einlagerung ist in Abbildung 4.3 wiedergebend. Dies ist der Zeitpunkt zu dem Druck und Temperatur am stärkstem gegenüber dem Ausgangszustand gestört sind. Die Abbildung zeigt dabei nur einen Quadranten des ganzen Zylinders, so dass der Verlauf im inneren des Modells sichtbar ist. In dieser Abbildung ist auch die Lage der Punkte eingezeichnet von denen die zeitliche Entwicklung der Temperatur, Deformation und Spannung weiter unten wiedergegeben ist. Der zeitliche Verlauf ist in den Abbildungen 4.4 und 4.5 für ausgewählte Punkte innerhalb des Modells wiedergegeben.

Es zeigt sich folgendes Bild: Durch die Temperaturerhöhung im Endlager kommt es zur thermischen Expansion des Gesteins. Dies führt zu einer Aufwölbung oberhalb des Endlagers mit Beträgen von über 12 cm. Die Verschiebung an der Oberfläche betragen immerhin noch mehr als 6 cm. Aufgrund der Aufwölbung oberhalb des Endlagers kommt es in Bereichen seitlich neben dem Endlager zu Extension. Dies kann man anhand des zeitlichen Verlaufs des Drucks (Abb. 4.13) erkennen. Insgesamt werden im Laufe der Zeit Bereiche in bis zu 2 km Entfernung deformiert und somit durch die Wärmeproduktion im Endlager beeinflusst. Selbst nach dem Abklingen der Aktivität im Endlager nach 100 000 a bleibt eine Netto-Deformation an der Oberfläche erhalten.

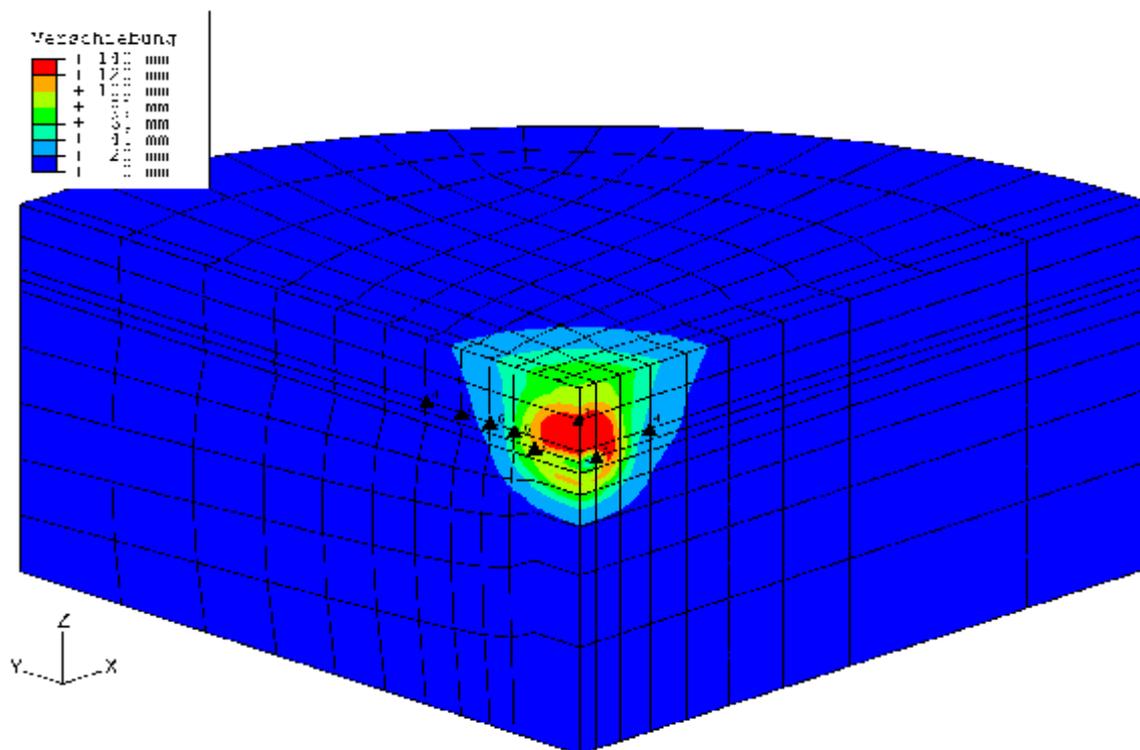


Figure 4.3: Deformation im Modell AR nach 310 a nach Beginn der Einlagerung. Die schwarzen Dreiecke kennzeichnen die Position der Punkte, deren zeitlicher Verlauf der Temperatur, Deformation und Spannung in den folgenden Abschnitten wiedergegeben ist.

4.3.2 Temperaturentwicklung

Abbildung 4.6 zeigt die Temperaturverteilung nach 310 a nach Beginn der Einlagerung. Der zeitliche Verlauf für ausgewählte Punkte innerhalb des Modells ist in Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8 wiedergegeben. Am Modellrand erkennt man gut die natürliche und ungestörte Temperaturverteilung aufgrund des natürlichen thermischen Gradienten von 30 K/km. In der Modellmitte ist dieses Feld stark durch die Wärmeproduktion im Endlager gestört. Es werden Temperaturerhöhungen um mehr als 90 K erreicht.

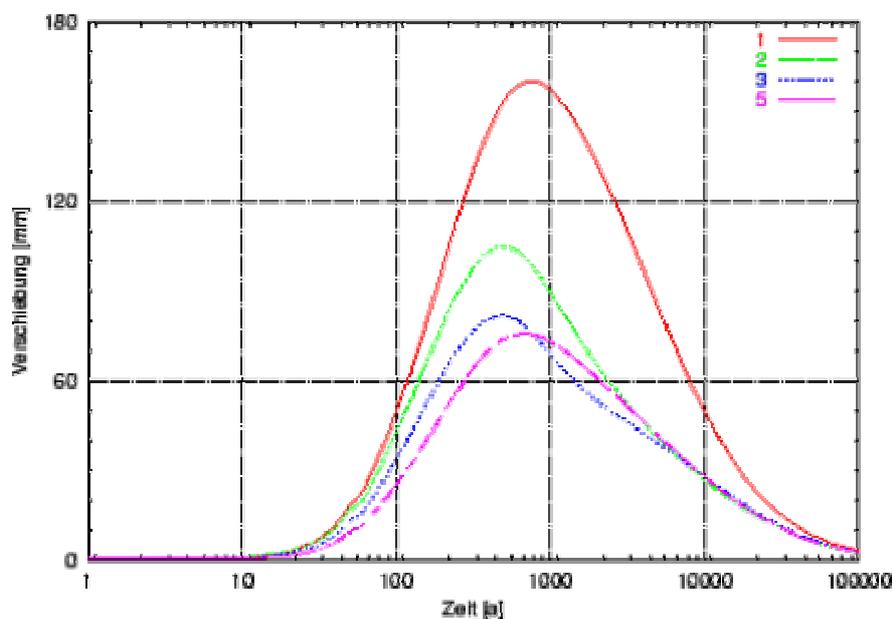


Figure 4.4: Zeitlicher Verlauf der Deformation an den Punkten 1-3 und 5 im Modell AR.

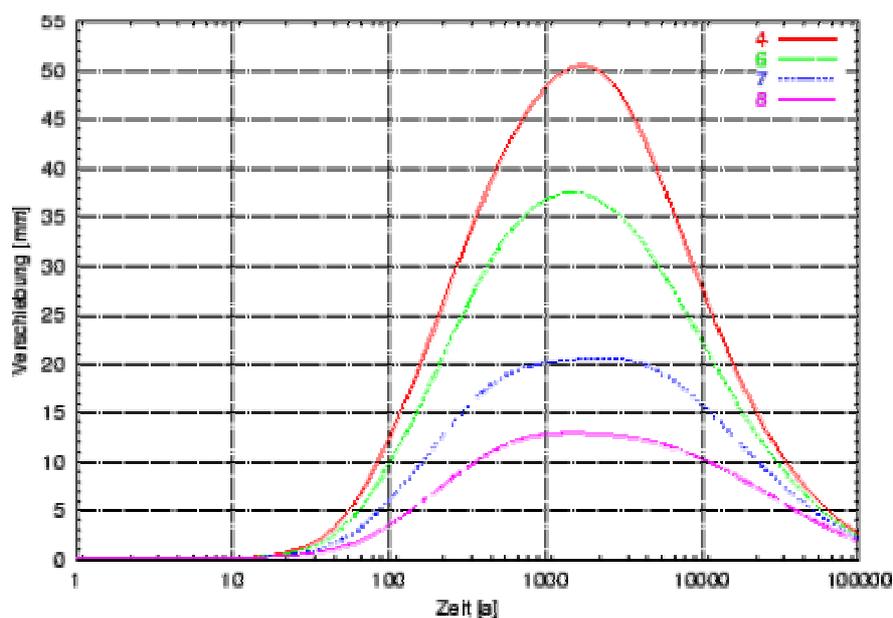


Figure 4.5: Zeitlicher Verlauf der Deformation an den Punkten 4 und 6-8 im Modell AR.

Besonders auffällig ist jedoch ein Bereich seitlich neben dem Endlager, in dem die Temperatur abnimmt. Dieser Bereich stimmt mit den Bereichen starker Extension überein. Dies bedeutet, dass dieser Bereich adiabatisch abkühlt. Neben dem direkten Einfluss der Temperatur aufgrund von Wärmeleitung und Wärmeproduktion in der unmittelbaren Umgebung des Endlagers erfährt das Gestein eine zusätzliche Temperaturveränderung aufgrund von Extension bzw. Kompression. Die hierdurch hervorgerufenen Temperaturänderungen können Amplituden von 7 K erreichen (Abb. 4.8).

Die Abbildung 4.8 zeigt auch sehr schön, wie einzelne Bereiche des Modells zunächst Extensionsspannungen und danach Kompressionsspannungen unterliegen und somit erst abkühlen und sich dann erwärmen. Es existieren sogar Bereiche, in denen das Gestein erst expandiert, dann komprimiert und dann wieder expandiert wird. Dies bestätigt sich in Abbildung 4.13, in der der Druckverlauf an den selben Stellen dargestellt ist.

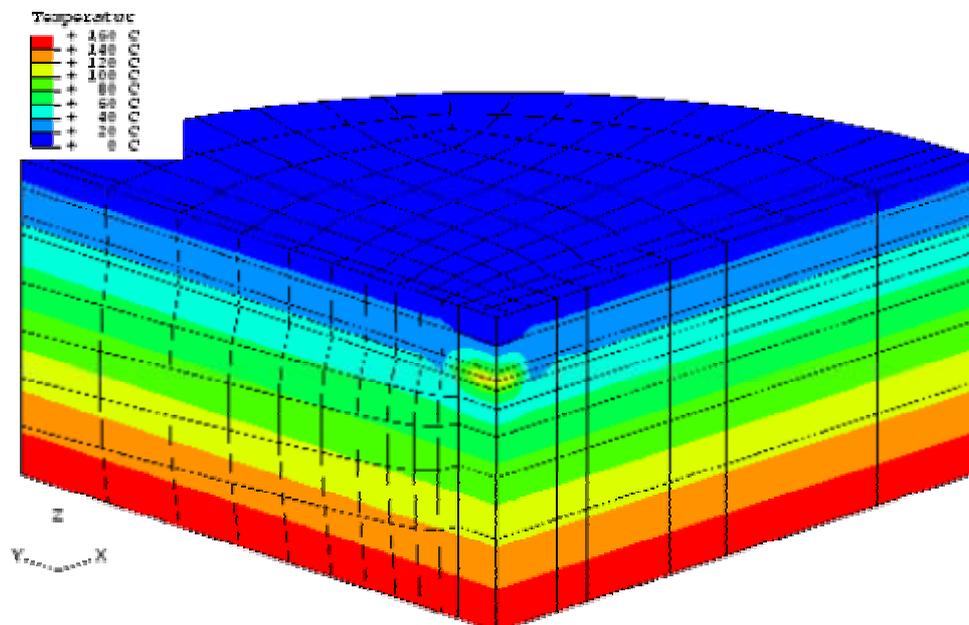


Figure 4.6: Temperatur im Modell AR nach 310 a nach Beginn der Einlagerung. Man erkennt deutlich die Abkühlung des Gesteins seitlich neben dem Endlager im Bereich starker Extension.

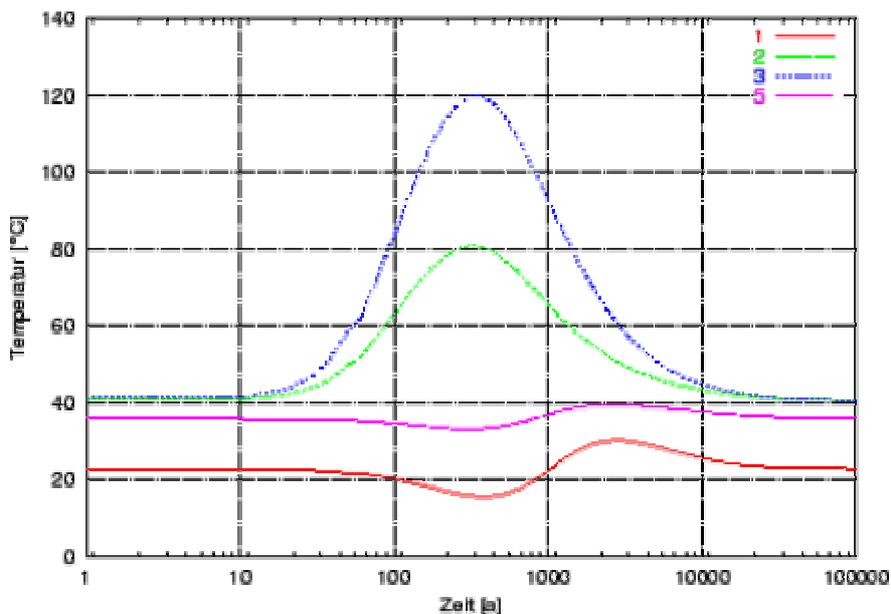


Figure 4.7: Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Punkten 1-3 und 5 im Modell AR.

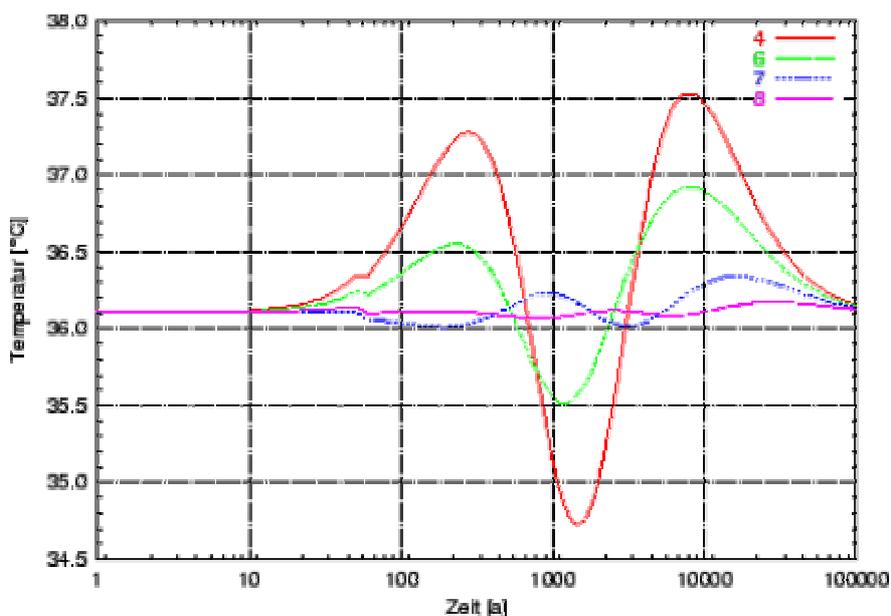


Figure 4.8: Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Punkten 4 und 6-8 im Modell AR.

4.3.3 Spannungsentwicklung

Für die Beurteilung der Temperaturverträglichkeit von Granit spielen insbesondere die durch die Temperaturvariation auftretenden Spannungen eine Rolle. Neben den einzelnen Komponenten des Spannungstensors eignen sich zum Vergleich insbesondere die Spannungsinvarianten Druck und Tresca-Spannung (äquivalent zur maximalen Scherspannung). Im Gegensatz zum Spannungstensor handelt es sich hierbei um skalare Werte. Die Tresca-Spannung fließt als Bruchkriterium in das Mohr-Coulombsche Bruchgesetz ein. Unterschreitet das Verhältnis der Normalspannung zur Tresca-Spannung einen bestimmten Wert, so kommt es zum Bruch des Gesteins. Der Grenzwert ist dabei

gesteinsabhängig und wird über die Kohäsion und den internen Reibungswinkel parametrisiert.

Abbildung 4.9 zeigt die Verteilung des Drucks nach 310 a nach Beginn der Einlagerung. Besonders auffällig ist der Bereich der Druckentlastung seitlich neben dem Endlager aufgrund der Extension, die dem lithostatischen Druck entgegen wirkt. Dies zeigt sich auch im zeitlichen Verlauf des Drucks für ausgewählte Punkte, der in Abbildung 4.13 wiedergegeben ist. Im Gegensatz hierzu nimmt der Druck oberhalb, innerhalb und in unmittelbarer Nähe zum Endlagers deutlich zu (Abb. 4.12).

Diese drei Bereiche sind bezüglich der Bruchanfälligkeit besonders kritisch zu beurteilen. Der zeitliche Verlauf der Tresca-Spannung für ausgewählte Punkte des Modells ist in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt. Anhand dieser Abbildung wird deutlich, wie stark die wirkende maximale Scherspannung an diesen Punkten innerhalb des Modellierungszeitraumes variiert. Die Scherspannungsvariationen erreichen Amplituden von über 13 Mpa. Dies entspricht gerade dem Wert der Kohäsion. Diese kann allerdings stark von Probe zu Probe variieren (die Standardabweichung der untersuchten Proben in JNC, 1999, beträgt 9.9 Mpa). **Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass es in diesen Bereichen zum Bruch des Gesteins kommt**, obwohl dies in der vorliegenden Berechnung aufgrund der relativ hohen gewählten durchschnittlichen Kohäsion von 13.2 Mpa nicht der Fall ist.

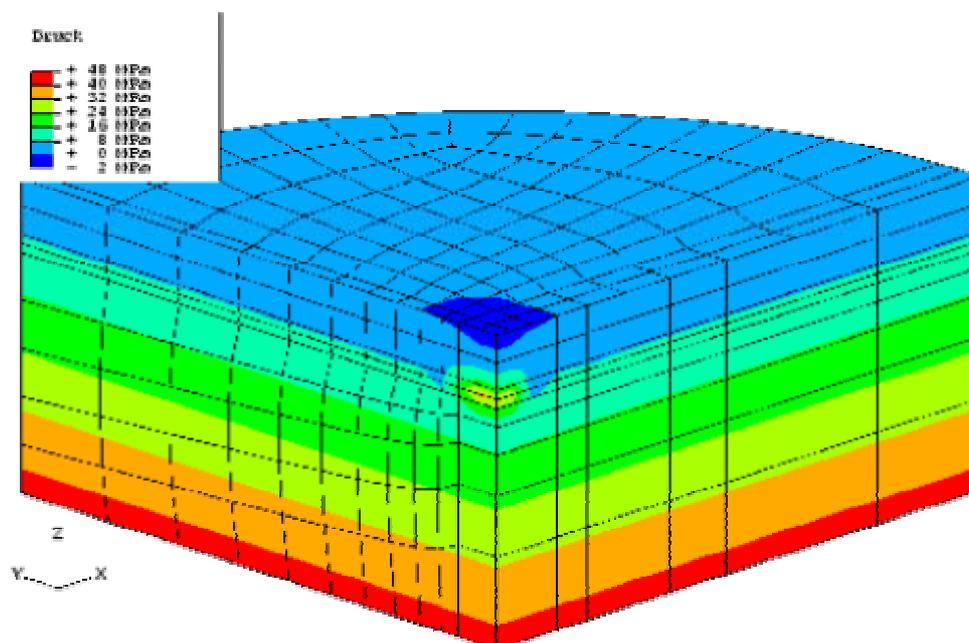


Figure 4.9: Druck im Modell AR nach 310 a nach Beginn der Einlagerung. Man erkennt deutlich die Entlastung des Gesteins seitlich neben dem Endlager im Bereich starker Extension.

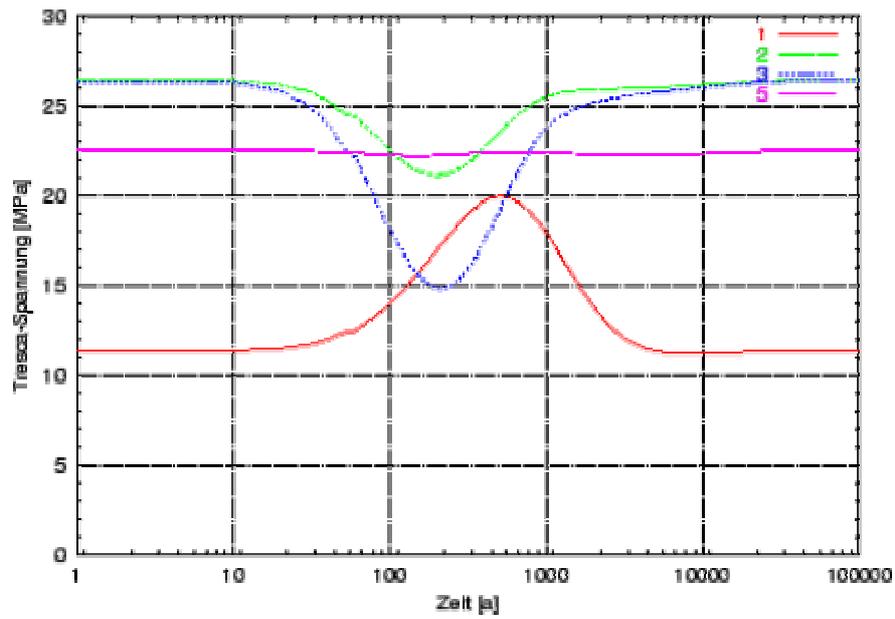


Figure 4.10: Zeitlicher Verlauf der Tresca-Spannung an den Punkten 1-3 und 5 im Modell AR.

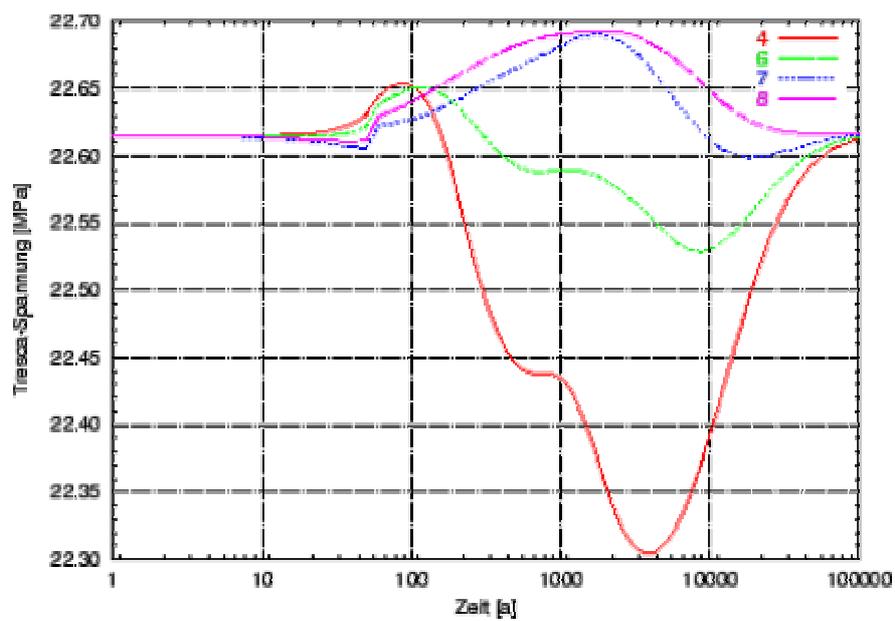


Figure 4.11: Zeitlicher Verlauf der Tresca-Spannung an den Punkten 4 und 6-8 im Modell AR.

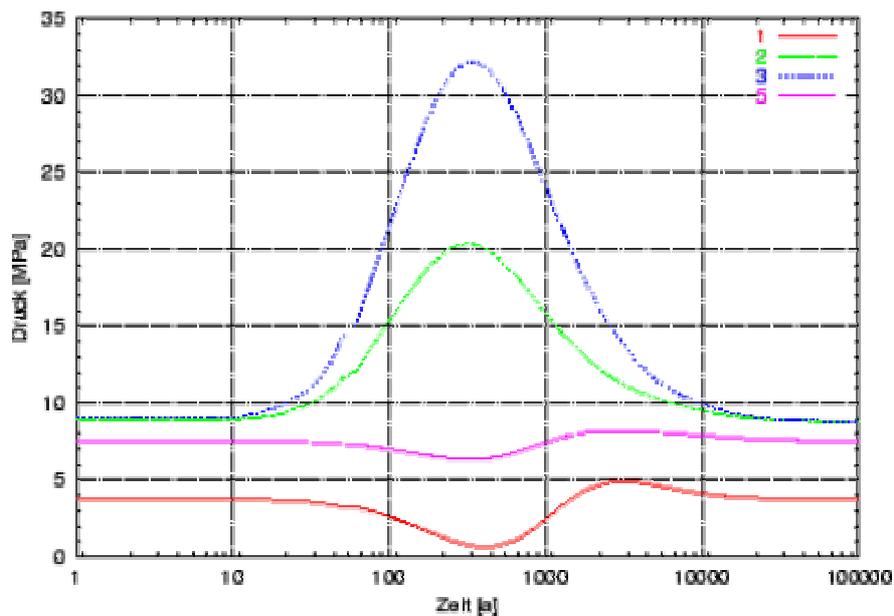


Figure 4.12: Zeitlicher Verlauf des Drucks an den Punkten 1-3 und 5 im Modell AR.

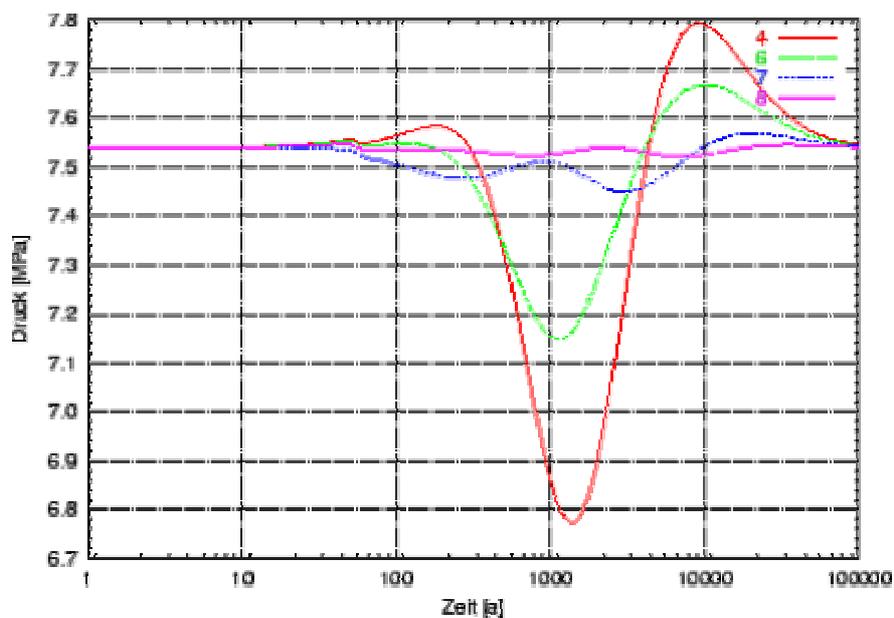


Figure 4.13: Zeitlicher Verlauf des Drucks an den Punkten 4 und 6-8 im Modell AR.

4.4 Das Modell PM

Das Modell PM berechnet die vollständig gekoppelte Spannungs- und Temperatur Verteilung mit Gesteinseigenschaften eines homogenen Tonsteines. Die folgenden Abschnitte geben den Temperaturverlauf als auch den Spannungsverlauf in der räumlichen und zeitlichen Entwicklung im Endlager und seiner Umgebung wieder. Dabei gilt den Veränderungen außerhalb des eigentlichen Endlagers besonderer Aufmerksamkeit.

4.4.1 Deformationsentwicklung

Die Gesamtdeformation für den Zustand nach 470 a nach Beginn der Einlagerung ist in Abbildung 4.14 wiedergebend. Dies ist der Zeitpunkt zu dem Druck und Temperatur am stärkstem gegenüber dem Ausgangszustand gestört sind. Es zeigt sich folgendes Bild: Durch die Temperaturerhöhung im Endlager kommt es zur thermischen Expansion des Gesteins. Dies führt zu einer Aufwölbung oberhalb des Endlagers mit Beträgen von über 33 cm. Die Verschiebung an der Oberfläche betragen immerhin noch mehr als 15 cm.

Aufgrund der Aufwölbung oberhalb des Endlagers kommt es in Bereichen seitlich neben dem Endlager zu Extension. Dies kann man anhand des zeitlichen Verlaufs des Drucks (Abb. 4.24) erkennen. Insgesamt werden im Laufe der Zeit Bereiche in bis zu 2 km Entfernung deformiert und somit durch die Wärmeproduktion im Endlager beeinflusst. Selbst nach dem Abklingen der Aktivität im Endlager nach 100 000 a bleibt eine Netto-Deformation an der Oberfläche erhalten.

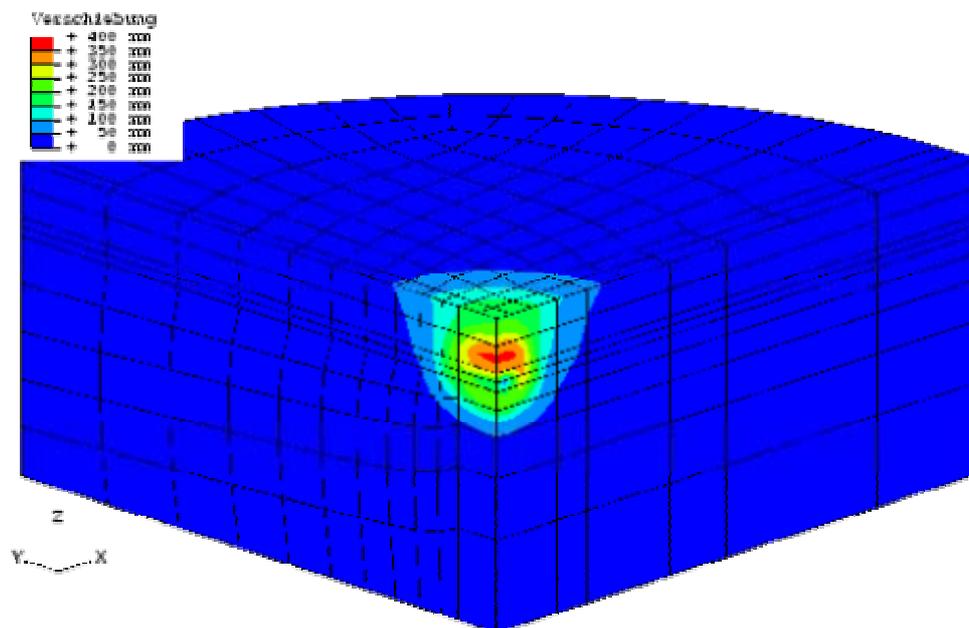


Figure 4.14: Deformation im Modell PM nach 470 a nach Beginn der Einlagerung.

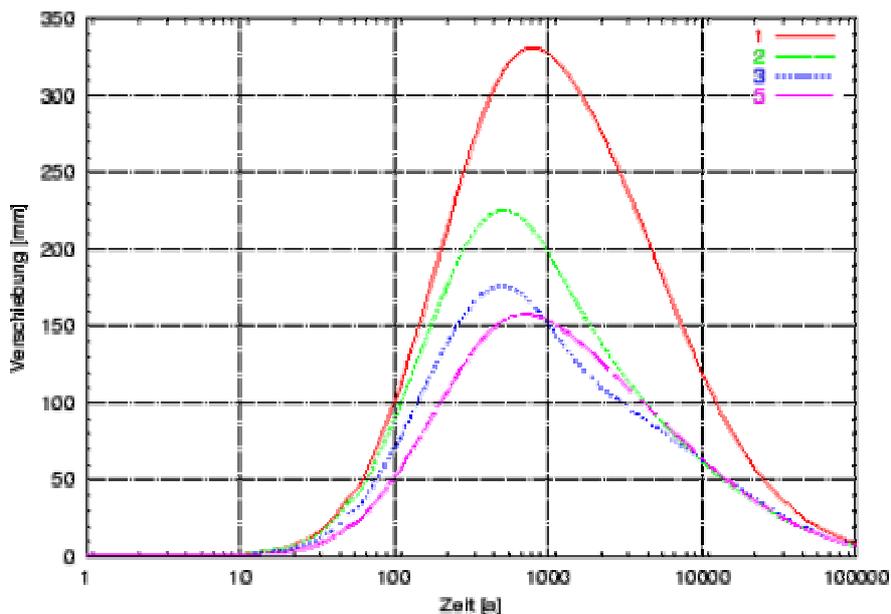


Figure 4.15: Zeitlicher Verlauf der Deformation an den Punkten 1-3 und 5 im Modell PM.

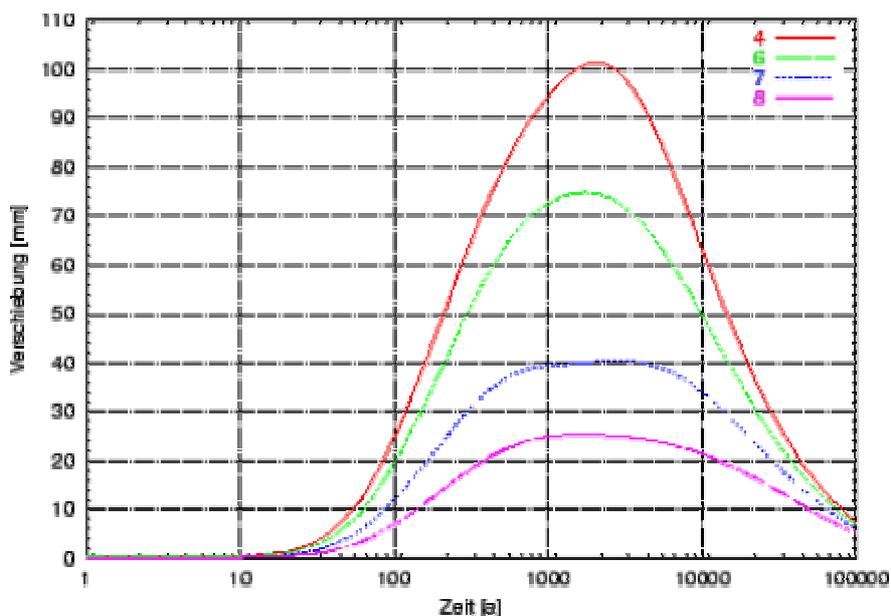


Figure 4.16: Zeitlicher Verlauf der Deformation an den Punkten 4 und 6-8 im Modell PM.

4.4.2 Temperaturentwicklung

Abbildung 4.17 zeigt die Temperaturverteilung nach 470 a nach Beginn der Einlagerung. Am Modellrand erkennt man gut die natürliche und ungestörte Temperaturverteilung aufgrund des natürlichen thermischen Gradienten von 30 K/km. In der Modellmitte ist dieses Feld stark durch die Wärmeproduktion im Endlager gestört. Es werden Temperaturerhöhungen um mehr als 140 K erreicht.

Besonders auffällig ist jedoch ein Bereich seitlich neben dem Endlager, in dem die Temperatur abnimmt. Dieser Bereich stimmt mit den Bereichen starker Extension überein: Dieser Bereich kühlt adiabatisch ab. Neben dem direkten Einfluss der Temperatur aufgrund von Wärmeleitung und Wärmeproduktion in der unmittelbaren Umgebung des Endlagers erfährt das Gestein eine zusätzliche Temperaturveränderung aufgrund von Extension bzw.

Kompression. Die hierdurch hervorgerufenen Temperaturänderungen können Amplituden von 4.5 K erreichen (Abb. 4.19). Die Abbildung 4.19 zeigt sehr schön, wie einzelne Bereiche des Modells zunächst Extensionsspannungen und danach Kompressionsspannungen unterliegen und somit erst abkühlen und dann sich erwärmen. Es existieren sogar Bereiche, in denen das Gestein erst expandiert, dann komprimiert und dann wieder expandiert wird. Dies bestätigt sich in Abbildung 4.24 in der der Druckverlauf an den selben Stellen dargestellt ist.

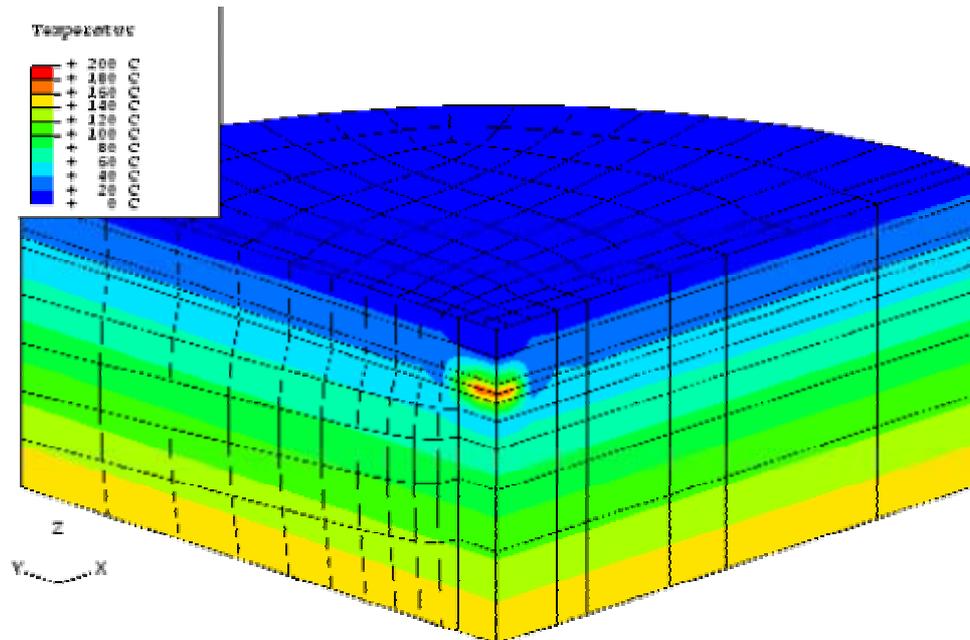


Figure 4.17: Temperatur im Modell PM nach 470 a nach Beginn der Einlagerung. Man erkennt deutlich die Abkühlung des Gesteins seitlich neben dem Endlager im Bereich starker Extension.

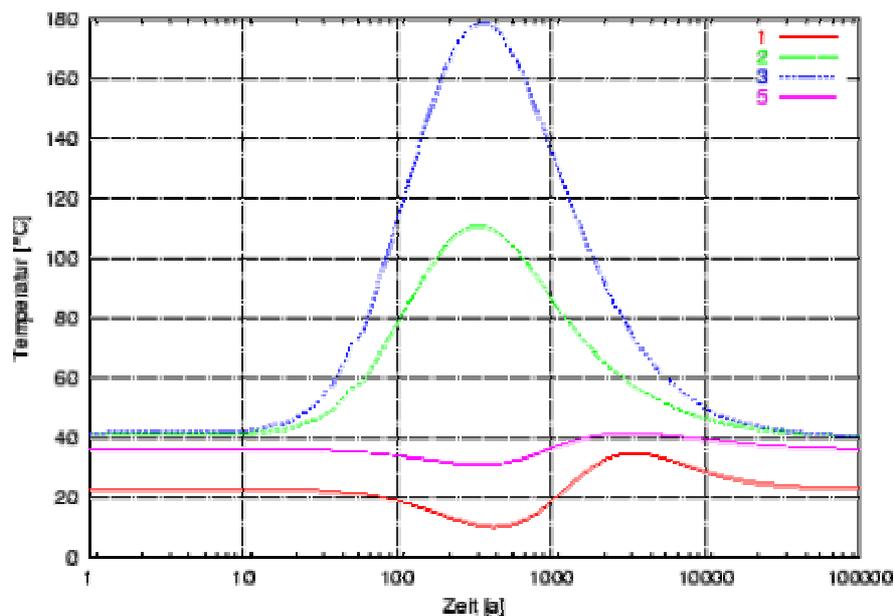


Figure 4.18: Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Punkten 1-3 und 5 im Modell PM.

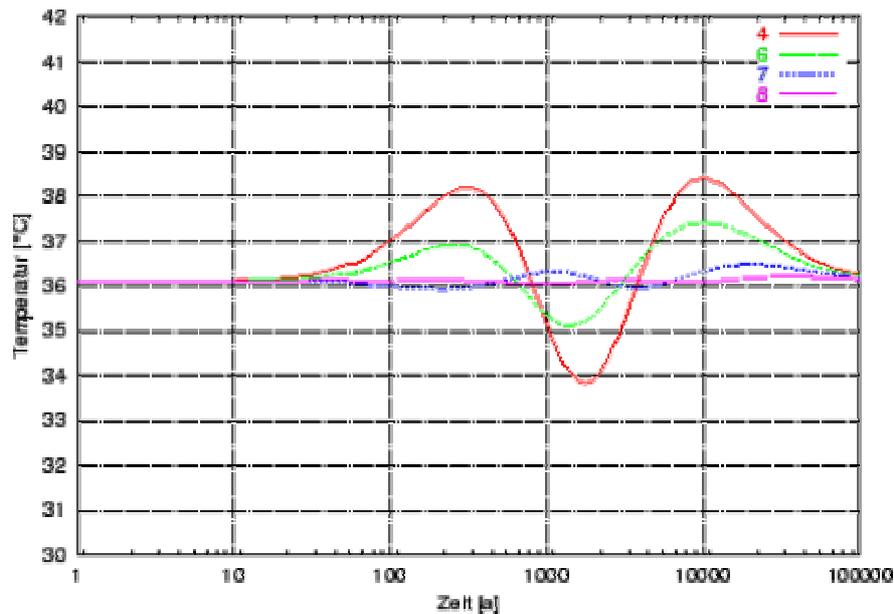


Figure 4.19: Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Punkten 4 und 6-8 im Modell PM.

4.4.3 Spannungsentwicklung

Abbildung 20 zeigt die Verteilung des Drucks nach 470 a nach Beginn der Einlagerung. Besonders auffällig (allerdings nicht so stark ausgeprägt wie beim Modell AR) ist der Bereich der Druckentlastung seitlich neben dem Endlager aufgrund der Extension, die dem lithostatischen Druck entgegen wirkt. Dies zeigt sich auch im zeitlichen Verlauf des Drucks für ausgewählte Punkte, der in Abbildung 24 wiedergegeben ist. Im Gegensatz hierzu nimmt der Druck oberhalb, innerhalb und in unmittelbarer Nähe zum Endlagers deutlich zu (Abb. 23). Diese drei Bereiche sind bezüglich der Bruchanfälligkeit besonders kritisch zu beurteilen. Der zeitliche Verlauf der Tresca-Spannung für ausgewählte Punkte des Modells ist in den Abbildungen 21 und 22 dargestellt. Anhand dieser Abbildung wird deutlich, wie stark die wirkende maximale Scherspannung an diesen Punkten innerhalb des Modellierungszeitraumes variiert. Die Scherspannungsvariationen erreichen Amplituden von über 6 MPa. Dies ist 6 mal höher als der Wert der Kohäsion. Diese kann allerdings stark von Probe zu Probe variieren (die Standardabweichung der untersuchten Proben in JNC (1999) beträgt 11.7 MPa, der Median nur 1.1 MPa!). **Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass es in diesen Bereichen zum Bruch des Gestein kommt**, obwohl dies in der vorliegenden Berechnung aufgrund der relativ hohen gewählten durchschnittlichen Kohäsion von 1.1 MPa nicht der Fall ist.

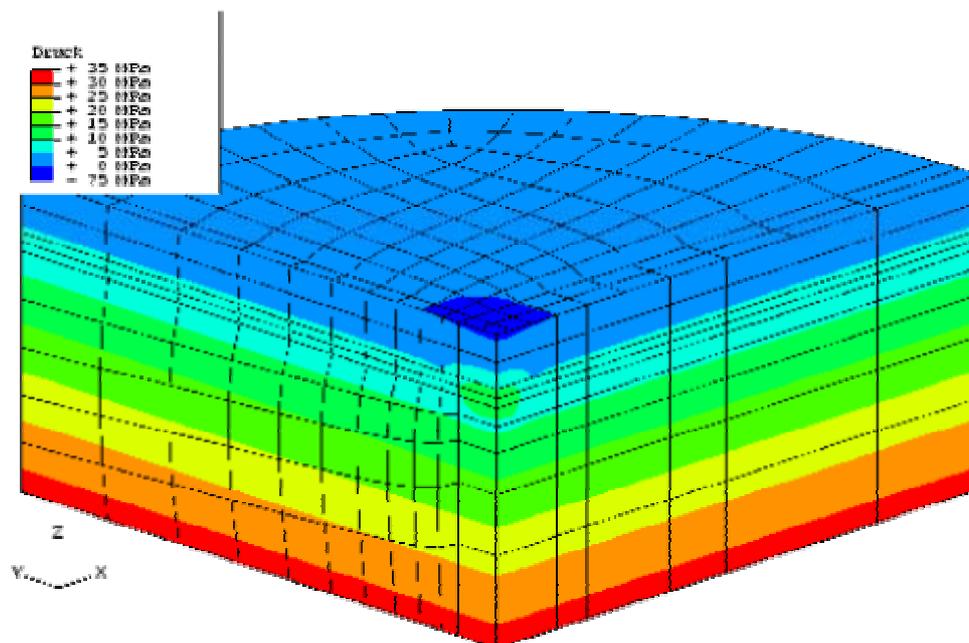


Figure 4.20: Druck im Modell PM nach 470 a nach Beginn der Einlagerung. Man erkennt deutlich die Entlastung des Gesteins seitlich neben dem Endlager im Bereich starker Extension.

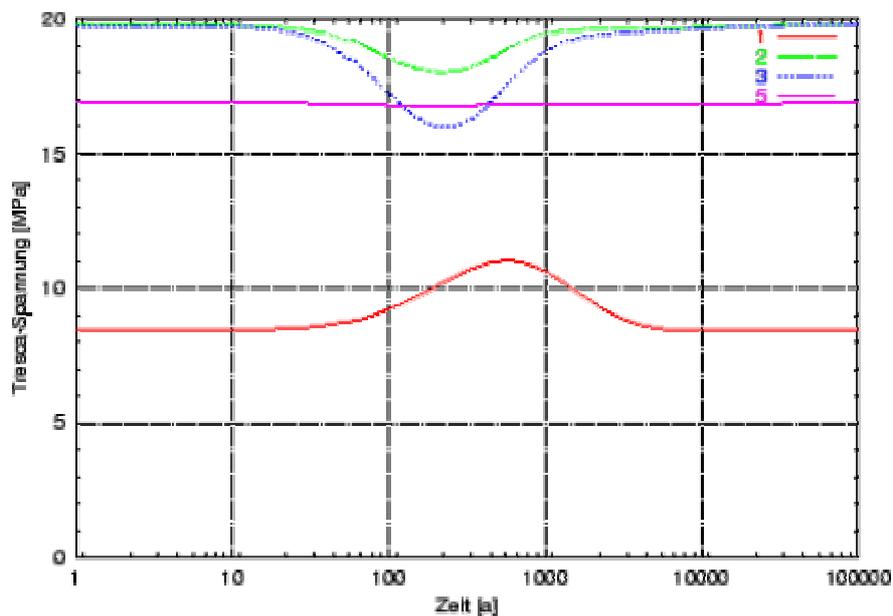


Figure 4.21: Zeitlicher Verlauf der Tresca-Spannung an den Punkten 1-3 und 5 im Modell PM.

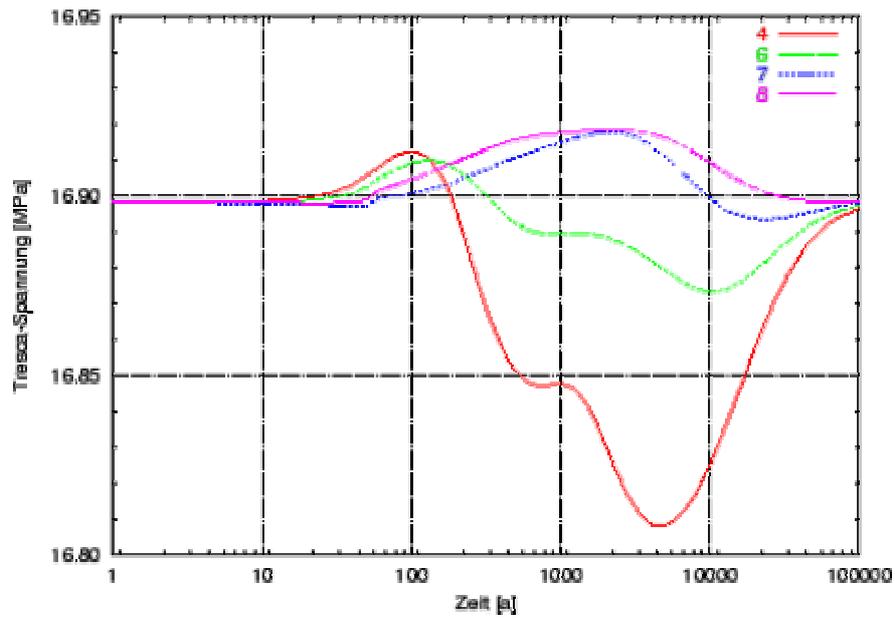


Figure 4.22: Zeitlicher Verlauf der Tresca-Spannung an den Punkten 4 und 6-8 im Modell PM.

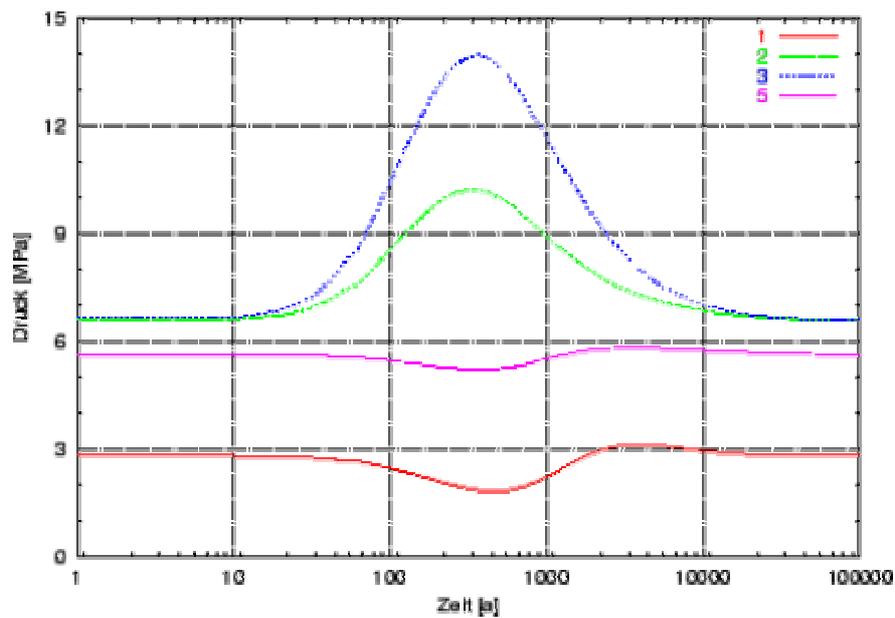


Figure 4.23: Zeitlicher Verlauf des Drucks an den Punkten 1-3 und 5 im Modell PM.

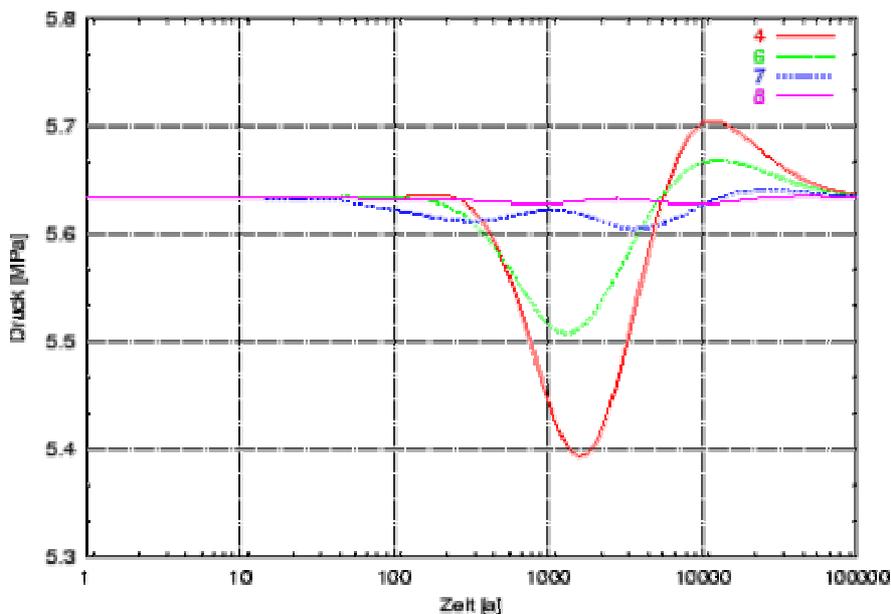


Figure 4.24: Zeitlicher Verlauf des Drucks an den Punkten 4 und 6-8 im Modell PM.

5. Ergebnisse und Konsequenzen der Modellierungen

In beiden Modellen zeigt sich, dass es im Bereich seitlich neben dem Endlager in Entfernungen von 500 m bis 2000 m zu starken Extensions-Deformationen und damit verbundenen Druckentlastungen kommt. Gleichzeitig wirken im selben Bereich starke Scherkräfte, so dass in diesen Bereichen mit dem Auftreten von Extensions-Brüchen gerechnet werden muss. Durch das Auftreten eines solchen Bruchs kann die weitere Entwicklung der Deformations-, Spannungs- und Temperaturverteilung stark von den hier vorgestellten Modellierungen abweichen. Dies gilt insbesondere bei einem dann sehr wahrscheinlichen Zufluss von Fluiden in den Bereich der Bruchzone und somit in unmittelbarer Nähe zum Endlager. Diesbezüglich sind die Materialeigenschaften von Tonstein (Modell PM) im Vergleich zum Granit (Modell AR) sehr viel ungünstiger.

Der Aufbau solcher ungünstigen Spannungen kann nur vermieden werden, wenn entweder das Volumen des Endlagers vergrößert oder die Wärmeproduktion im Endlager verringert werden. In beiden Fällen kommt es zu kleineren Gesamtdeformationen und somit zu geringeren Variationen der auftretenden Spannungen. Dadurch sollte es auch möglich sein, die Temperaturen im Endlager unter 100° C zu halten, wodurch damit verbundene Risiken, die zum Beispiel in Bel & Bernier (2001) oder Horseman & McEwen (1996) angesprochen werden, vermieden werden.

6. Diskussion

Die zur quantitativen Beschreibung und Beurteilung der Temperaturverträglichkeit von Gesteinskörpern (in situ) einzusetzenden Messgrößen sind nur mit erheblichem technischen Aufwand zu bestimmen. Üblicherweise und damit auch im Rahmen der Standortauswahl für Endlager stützen sich daher die vorläufigen Beurteilungen der Temperaturverträglichkeit nicht auf Messergebnisse, sondern auf die erfahrungsbasierte Einschätzung anhand des Gesteinstyps. Diese Erfahrung beruht einerseits auf Laborexperimenten, Großversuchen (z.B. im Forschungsbergwerk Asse) und auf Modelluntersuchungen. Dadurch wird der Typ eines Gesteinskörpers als Indikator für dessen Temperaturverträglichkeit eingesetzt. Dabei wird angenommen, dass diese Eigenschaften bei verschiedenen Gesteinskörpern eines bestimmten Gesteinstyps erfahrungsgemäß innerhalb einer charakteristischen Bandbreite liegen.

Dies ist ein entscheidender Grund dafür, dass bei der Suche nach Standorten mit bestimmten Anforderungen an die Temperaturverträglichkeit bei der Auswahl von Endlagerstandorten für radioaktive Abfälle sehr früh innerhalb des Verfahrens eine Festlegung auf den/die als Wirtsgestein(e) zu bevorzugenden Gesteinstyp(en) erfolgte. Diese frühe Festlegung erleichtert die Ableitung gesteinspezifischer Auswahlkriterien erheblich. Unabhängig davon, dass damit die vom Arbeitskreis betonte Bedeutung der "günstigen geologischen Gesamtsituation" zunächst unberücksichtigt bleibt, ist diese frühe Festlegung auch methodisch sehr problematisch, da sie voraussetzt, dass die Unterscheidung von Gesteinstypen hinsichtlich Temperaturverträglichkeit zuverlässig und möglichst eindeutig durchgeführt werden kann.

Dies ist allerdings mit großen Problemen verbunden, da die für einen bestimmten Gesteinstyp charakteristischen Eigenschaften erhebliche Bandbreiten überdecken. Die Bandbreiten verschiedener Gesteinstypen können einander weit überlappen. Weiterhin sind die Daten zur Temperaturverträglichkeit mit unterschiedlicher Zielsetzung, mit unterschiedlichen Verfahren und unterschiedlichem technisch-wissenschaftlichem Standard erhoben worden. Messtechnische Qualität und Aussagekraft der zu einem Gesteinstyp vorliegenden Daten sind uneinheitlich. Erfahrungsbasierte Zuordnungen von Bandbreiten der Temperaturverträglichkeiten zu bestimmten Gesteinstypen gehen auf Laborversuche und numerische Modellierungen zurück.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beinhalten zwar die gleichen Probleme der Daten-Erhebung, jedoch haben sie zwei Vorteile:

- (1) Die Angaben beziehen sich auf dreidimensionale Betrachtungen der Wärmeausbreitung und
- (2) Sie berücksichtigen die Kopplung von Temperatur und Spannung.

Noch nicht berücksichtigt sind gesteinsphysikalische Effekte, etwa der Veränderung des Material durch Temperatur und Druck. Hierfür sind aber jetzt die Randbedingungen im Bereich des Endlagers bereit gestellt worden. Derartige Untersuchungen sollten angeschlossen werden. Hierzu muss man allerdings fest stellen, dass die Angaben in der Literatur zum Temperatur-Verhalten von Tonsteinen bislang noch sehr unscharf sind. Die besten Angaben liegen nur für hohe Temperaturen vor, da dort der Ton als Werkstoff interessant ist, während für den hier interessierenden Bereich der Temperatur keine eindeutigen Hinweise zu finden sind. In diesem Bereich besteht offensichtlich noch ein erheblicher Forschungs-Bedarf.

Die hier ermittelten Spannungen sind als Randbedingungen für die Interpretation der Ergebnisse der Studien Lux et al. (2002a/b) an zu sehen, da sich im Einzelfall diese Spannungen mit den dort ermittelten überlagern und zu Verschiebungen der Grenzwerte führen können.

7. Ableitung eines Kriteriums

Die Durchsicht der Literatur und die hier vorgelegten Untersuchungen zeigen, dass es kein einheitliche Formulierung für ein Kriterium geben kann, sondern nur eine Kombination von zwei Aussagen:

- Einerseits ist es günstig, wenn das Gestein möglichst hohe Temperaturen verträgt, ohne seine Eigenschaften zu verändern (*mineralogischer Ansatz*); je höher die erlaubte Temperatur, desto kleiner kann das benötigte Volumen des Endlagers sein. Durch die bei Tonsteinen beobachtete Freisetzung von Kristallwasser bei Temperaturen von je nach Gestein 95°C bis 120°C sind jedoch Risse durch Schrumpfungen zu befürchten, die zur Öffnung von Wasserwegsamkeiten führen. *Daher müssen höhere Temperaturen vermieden werden.*
- Andererseits ist es günstig, wenn die Temperatur im Endlager unter 100°C bleibt, damit im Umfeld des Endlagers keine thermo-mechanischen Spannungen auftreten, die ihrerseits zu Brüchen führen und damit Wasserwegsamkeiten öffnen können (*thermo-mechanischer Ansatz*). Dies gilt auch für Granit, da die Festigkeit, also die Bandbreite der Material-Parameter so groß ist, *dass bei den zu erwartenden Spannungen Brüche nicht ausgeschlossen werden können.*

Die Begrenzung der Temperatur durch das *mineralogische Kriterium* gilt speziell für Tonstein, aber auch für Granit, da dort durch die Verfüllung mit Bentonit als zusätzliche technische Barriere ein Material verwendet wird, das ähnliche Eigenschaften wie Tonstein aufweist. Somit kann der aus mineralogischer Sicht zu erwartende Vorteil der besseren Temperaturverträglichkeit von Granit gegenüber Tonstein nicht ausgenutzt werden.

Die Berechnungen zeigen, dass die Kopplung der Temperatur mit der Spannung keinesfalls außer Acht gelassen werden darf. Im Bereich seitlich neben dem Endlager treten in Entfernungen von 500 m bis 2000 m starke Extensions-Deformationen auf, wodurch es zu Druckentlastungen kommt. Da gleichzeitig im selben Bereich starke Scherkräfte wirken, muss in diesen Bereichen mit dem Auftreten von Extensions-Brüchen gerechnet werden, wenn die Temperaturen im Endlager über 100°C ansteigen. Dies bedeutet, dass die Wärmebelastung unter einem Wert gehalten werden muss, der garantiert, dass die Temperaturen im Endlager unter 100°C bleiben. *Die kritische Zeit, während der Spannungsspitzen auftreten und daher mit der Überschreitung der Bruchspannung zu rechnen ist, liegt etwa zwischen 100 Jahren und 10 000 Jahren nach Abschluss der Einlagerung.* Die zu erwartenden Effekte müssen im Einzelfall allerdings noch mit der Standsicherheit des Gebirges in Zusammenhang gebracht werden (Lux et al., 2002a; 2002b), da die hier berechneten Temperatur-Spannungen als Randbedingung eingehen.

Die erzielten Ergebnisse in dieser Studie führen zu der Empfehlung, die Ausdehnung des Endlagers und den Umfang der Einlagerung entsprechend aufeinander ab zu stimmen. Die vorliegenden Modellrechnungen basieren auf einer Packungsdichte von 6000 m³ Endlager pro Kubikmeter Abfall. Damit umfasst das Endlager bei einem abgeschätzten Anfall von 24 000 m³ stark Wärme entwickelnder Abfälle etwa 144 Mio Kubikmeter; dann liegt bei einem Wärme-Eintrag von ca. 13 200 KW ein Wert von 0.1 Wm⁻³ vor. *Bereits bei diesem Wärme-Eintrag muss in den Randbereichen mit Scherbrüchen gerechnet werden.* Eine Verkleinerung des Endlager-Volumens würde die Wärmeproduktion konzentrieren und damit die Gefahr von Scherbrüchen durch Temperatur-Spannungen erhöhen.

Als Kriterium lässt sich demnach für Granit und Tonstein kurz formulieren:

Das Volumen des Endlagers muss gewährleisten, dass die mittlere Wärmeproduktion keinesfalls über 0.1 Wm⁻³ ansteigt, da sonst mit Temperaturen von über 100°C zu rechnen ist. Nur so können mineralogische Veränderungen vermieden und das Risiko thermo-mechanischer Brüche vermindert werden.

Weiterhin wird empfohlen, zur Verringerung von Spannungsmaxima im Bereich neben dem Endlager die besonders stark wärmeentwickelnden Abfall-Arten im Zentrum des Endlagers und die schwächer wärmeentwickelnden am Rande zu lagern.

8. Literatur

- AKEnd, 2001. 2. Zwischenbericht, Technische Berichte des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte des BMU, 180 S. BfS, 2001. Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten – Zwischenbericht: Bedeutung der Standorteigenschaften für die Standortauswahl. KASAM, 2001. Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001. Stockholm, 371 S.
- Bel, J. & Bernier, F., 2001. Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HLW and Spent Fuel), Techn. Ber., NIRAS/ONDRAF, Brussels, EIG EURIDICE, Mol.
- Bouchet, A., A. Meunier & B. Velde, 1988a. Hydrothermal mineral assemblages containing two discrete illite / smectite minerals. Bull. Miner 111, 587 – 599.
- Bouchet, A., D. Proust, A. Meunier & D. Beaufort, 1988b. High-charge to low-charge smectite reaction in hydrothermal alteration processes. Clay Min, 23, 133 – 146.
- Bruce, C.H., 1984. Smectite dehydration – its relation to structural development and hydrocarbon accumulation in northern Gulf of Mexico basin. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 68/6, 673 – 683.
- Engelmann, H.J., Lommerzheim, A., Linn, M. & Müller-Hoppe, N., 1993. Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 82101) – Temperaturfeldberechnungen zur mehrsöhligen Streckenlagerung. DEAB T 54.
- Engelmann, H.J., Lommerzheim, A., Linn, M. & Müller-Hoppe, N., 1993. Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 82101) – Vergleichende Temperaturfeldberechnungen für die Konzepte SL* und GBS“A“ bei 200°C und 150°C Auslegungstemperatur. DEAB T 55.
- Engelmann, H.J., Lommerzheim, A., Linn, M. & Müller-Hoppe, N., 1993. Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 82101) – Grubengebäudeplanungen und Temperaturfeldberechnungen für das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstockes Gorleben. DEAB T 56.
- Heide, K., 1979. Dynamische und Thermische Analysenmethoden. Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 311 S. und 11 Tafeln.
- Horseman, S. T. & McEwen, T. J., 1996. Thermal constraints on disposal of heat-emitting waste in argillaceous rocks, In: Third International Workshop of Clay Barriers -- ISMES -- 1993, Nr. 41 In Engineering Geology, S. 5-16, Elsevier, Amsterdam.
- Jasmund, K. & G. Lagaly (Hrsg.), 1993. Tonminerale und Tone. Steinkopf Verlag, Darmstadt, 490 S.
- JNC, 1999: H12. Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Techn. Ber., Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).
- Lassabatere, Thierry, Christophe Imbert & M.A. Etile, 1999. Comportement hydromecanique d'une argile gonflante non saturee; experience, modelisation et application a la resaturation d'une barriere ouvree Comportement hydromecanique d'une argile gonflante non saturee; experience, modelisation et application a la resaturation d'une barriere ouvree (Hydromechanical behavior of a nonsaturated swelling clay; experience, modelling, and application to the resaturation of an engineered barrier. Bulletin de la Societe Geologique de France. 170; 2, Pages 241-252. 1999.
- Lux, K.-H., G.M. Lomo-Appeyh, und S. Eberth, 2002a. Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen", Gutachten im Auftrag des AKEnd, ca. 110 S.
- Lux, K.-H., G.M. Lomo-Appeyh, und S. Eberth, 2002b. Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten ", Gutachten im Auftrag des AKEnd, ca. 120 S.

- Oscarson, D.W., Dixon, D.A., and Hume, H.B., 1996. Mass transport through defected bentonite plugs. *Applied Clay Science*, 11, 127 – 142.
- Pearson, M.J. & J.S. Small, 1988. Illite – Smectite diagenesis and paleotemperatures in northern North Sea quaternary to mesozoic shale sequences. *Clay Minerals*, 23, 109 – 132.
- TRW Environmental Safety Systems Inc., 1999. Civilian Radioactive Waste Management System Management & Operating Contractor, Enhanced Design Alternative I: Low Temperature Design. BCAA00000-01717-2200-00006 REV 00, June 18, 1999. Prepared for U.S. Department of Energy.
- Velde, B. (Ed.), 1995. *Origin and mineralogy of clays – clays and the environment*. Springer Verlag, Berlin, 335 p.