

INGENIEURBÜRO

PROFESSOR DUDDECK UND PARTNER GmbH

Beratende Ingenieure: Konstruktiver Ingenieurbau · Brückenbau · Tunnelbau

B:\KONRAD\GUT-8

Gutachtliche Stellungnahme

zum

Nachweis der Machbarkeit der Schachtverfüllung

(Bericht Teil D, EU 438)

erstellt für

den Niedersächsischen Umweltminister,

über

das Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld

Braunschweig, den 17.01.1994

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Literaturverzeichnis	5
Anlagenverzeichnis	7
1. Vorbemerkung, Aufgabenstellung	8
2. Geologische und hydrogeologische Verhältnisse, Abteufen der Schächte	9
2.1 Darstellung des Antragstellers	9
2.2 Stellungnahme	9
3. Konzept für die Verfüllung	10
3.1 Darstellung des Antragstellers	10
3.2 Stellungnahme	12
4. Auflockerungszone im Bereich der Unterkreide für den bestehenden Zustand	14
4.1 Allgemeines, Nachweisgang	14
4.1.1 Darstellung des Antragstellers	14
4.1.2 Stellungnahme	14
4.2 Ergebnisse des Untersuchungsprogramms	15
4.2.1 Darstellung des Antragstellers	15
4.2.2 Stellungnahme	16
4.3 Die Gebirgsdehnungs-Durchlässigkeits- beziehung	16
4.3.1 Darstellung des Antragstellers	16
4.3.2 Stellungnahme	17
4.4 Berechnungen zum bestehenden Zustand der Schächte	17
4.4.1 Darstellung des Antragstellers	17
4.4.2 Stellungnahme	18
5. Mineralische Abdichtung im Bereich der Unterkreide, Variante A	20
5.1 Gang der Berechnungen zum verfüllten Zustand der Schächte	20
5.1.1 Darstellung des Antragstellers	20
5.1.2 Stellungnahme	21
5.2 Bodenmechanische Kennwerte der Verfüll- materialien	21
5.2.1 Darstellung des Antragstellers	21
5.2.2 Stellungnahme	21

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
5.3	Spannungen und Verformungen in der Gleit- schicht aus Ton	22
5.3.1	Darstellung des Antragstellers	22
5.3.2	Stellungnahme	22
5.4	Spannungen und Verformungen im Kern	22
5.4.1	Darstellung des Antragstellers	22
5.4.2	Stellungnahme	24
5.5	Wechselwirkung zwischen Kern, Gleit- schicht und Gebirge	27
5.5.1	Darstellung des Antragstellers	27
5.5.2	Stellungnahme	27
5.6	Anstieg des Grundwassers	29
5.6.1	Darstellung des Antragstellers	29
5.6.2	Stellungnahme	29
6.	Mineralische Abdichtung, Variante B	30
6.1	Quelleigenschaften hochverdichteter Bentonite	30
6.1.1	Darstellung des Antragstellers	30
6.1.2	Stellungnahme	30
6.2	Spannungen und Verformungen im Kern	30
6.2.1	Darstellung des Antragstellers	30
6.2.2	Stellungnahme	31
6.3	Kennlinie des Gebirges	31
6.3.1	Darstellung des Antragstellers	31
6.3.2	Stellungnahme	31
6.4	Wechselwirkung zwischen Kern, Bentonit- ring und Gebirge	32
6.4.1	Darstellung des Antragstellers	32
6.4.2	Stellungnahme	32
7.	Nachweis der Dichtigkeit der verfüllten Schächte	33
7.1	Anforderungen an die Dichtigkeit der verfüllten Schächte	33
7.1.1	Darstellung des Antragstellers	33
7.1.2	Stellungnahme	33
7.2	Transmissivität der verfüllten Schächte	33
7.2.1	Darstellung des Antragstellers	33
7.2.2	Stellungnahme	33

Inhaltsverzeichnis

	Seite
7.3 Transmissivität der Auflockerungszone im Bereich der Versuchsstrecken	34
7.3.1 Darstellung des Antragstellers	34
7.3.2 Stellungnahme	34
7.4 Mittlere Transmissivität der verfüllten Schächte im Bereich der Unterkreide	35
7.4.1 Darstellung des Antragstellers	35
7.4.2 Stellungnahme	36
8. Stützsäule	37
8.1 Materialeigenschaften	37
8.1.1 Darstellung des Antragstellers	37
8.1.2 Stellungnahme	37
8.2 Spannungen in der Stützsäule und erdstatische Nachweise	37
8.2.1 Darstellung des Antragstellers	37
8.2.2 Stellungnahme	38
9. Ausführung der Schachtverfüllung	39
9.1 Allgemeines	39
9.1.1 Darstellung des Antragstellers	39
9.1.2 Stellungnahme	39
9.2 Einbau der Stützsäule	39
9.2.1 Darstellung des Antragstellers	39
9.2.2 Stellungnahme	40
9.3 Aufweitung der Schächte, Einbau der mineralischen Abdichtung	40
9.3.1 Darstellung des Antragstellers	40
9.3.2 Stellungnahme	40
9.4 Abdichtung des Hilssandsteins im Schacht Konrad 2	41
9.4.1 Darstellung des Antragstellers	41
9.4.2 Stellungnahme	41
10. Schlußbemerkung	42

Literatur

- [1] Felsmechanik, W. Wittke,
Springer Verlag, 1984
- [2] Grundbau Taschenbuch, 3. Auflage, Teil 1,
Verlag W. Ernst und Sohn, 1980
- [3] Abriß der Ingenieurgeologie, 2. Auflage, H. Prinz,
Enke Verlag Stuttgart, 1991
- [4] ██████████ - Abdichtungsmaterial, Ergebnisse der Un-
tersuchungen zu Materialeigenschaften und Material-
verhalten, unveröffentlichte Mitteilung, April 1990
- [5] Bucher, F. und Spiegel, U.: Quelldruck von hochver-
dichteten Bentoniten, Technischer Bericht 84-18 der
Nagra, IGB der ETH Zürich, Dezember 1984.
- [6] Bucher, F. und Müller-Vonmoos, M.: Bentonit als
technische Barriere bei der Endlagerung hochradio-
aktiver Abfälle; in: Mitteilungen des IGB der ETH-
Zürich, Nr. 133, 1988.
- [7] Pusch, R. et al.: Final Report of the Borehole,
Shaft and Tunnel Sealing Test - Vol. II: Shaft
plugging, Technical Report 87-26 Nagra, Jan. 1987.
- EU 81.1 Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborunter-
suchungen an Gesteinsproben aus dem Hangend- und
Liegendbereich der Grube Konrad.
Parameterbestimmung für Standsicherheitsberechnun-
gen, Ergebnisaufbereitung für numerische Berech-
nung, BGR, 04.09.86

- EU 99.2 Ergebnisse von festigkeitsmechan. Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Oxford und Kimmridge. Ein- und triaxiale Laborversuche mit Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens für Parameter zu Standsicherheitsberechnungen, BGR, Dez. 86.
- EU 424 Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343 m Sohle), Bericht Teil A I, Ing.-Büro Prof. Wittke GmbH, 22.03.91.
- EU 437 Endlager Konrad, Schachtverfüllung/Alte Bohrungen, Bericht Teil E, Nachweis der Dichtigkeit alter Bohrungen, Ing.-Büro Prof. Wittke GmbH, 28.06.91
- EU 454 Endlager Konrad Schachtverfüllung/Alte Bohrungen Bericht Teil A II, Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541 m-Sohle), 04.12.91
- EU 476 Stellungnahme zur EU 438, Rev. 00 "Nachweis der Machbarkeit der Schachtverfüllung", Ing.-Büro Wittke GmbH, 28.06.93

Anlagen

- Nr. 1 Mineralische Abdichtung, Variante A, Ermittlung der Konsolidationszeit des Tons, EU 438, Abb. D-5.12
- Nr. 2 Mineralische Abdichtung, Variante A, Spannungen im Kern während der Herstellung der mineralischen Abdichtung, EU 438, Abb. D-5.13
- Nr. 3 Mineralische Abdichtung, Variante A, Kennlinien des Kerns für die Teufen 350 und 550 m (Schacht Konrad 2), EU 438, Abb. D-5.15
- Nr. 4 Mineralische Abdichtung, Variante A, Radialspannung und Radialverschiebungen im verfüllten Zustand, Teufe 350 m (Schacht Konrad 2), EU 438, Abb. D-5.16
- Nr. 5 Mineralische Abdichtung, Variante A, Radialspannung und Radialverschiebungen im verfüllten Zustand, Teufe 550 m (Schacht Konrad 2), EU 438, Abb. D-5.17

1. Vorbemerkung, Aufgabenstellung

Das projektierte Endlager Konrad wird zur Biosphäre hin durch die Tonsteine der Unterkreide abgeschlossen. Die beiden Schächte des ehemaligen Erzbergwerks, die in der Betriebsphase des Endlagers genutzt werden sollen, stellen für die Nachbetriebsphase Durchbrüche in den Barrierschichten dar. Aus diesem Grund sollen sie nach Beendigung der Einlagerung so dicht verschlossen werden, daß sie keine unzulässig große Wegsamkeit für radionuklid belastete Wasser bilden. In der "Erläuternden Unterlage EU 438" "Endlager Konrad, Schachtverfüllung/Alte Bohrungen, Bericht Teil D, Nachweis der Machbarkeit der Schachtverfüllung" wird ein Verfüllkonzept für die Schächte dargestellt und eine ausreichend kleine Durchlässigkeit der verfüllten Schächte nachgewiesen. Verfasser dieses Berichts ist das Ing.-Büro Prof. Dr.-Ing. Wittke GmbH, Aachen, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Das Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld beurteilt die o.g. Unterlage in bergbaulicher Hinsicht. Im Rahmen dieser Beurteilung werden in der hiermit vorgelegten Stellungnahme die Machbarkeit der Verfüllung und die Dichtigkeitsnachweise in felsmechanischer Hinsicht begutachtet.

2. Geologische und hydrogeologische Verhältnisse, Abteufen der Schächte

2.1 Darstellung des Antragstellers

Im Kapitel 2 der EU 438 stellt der Antragsteller die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der Schachtanlage dar. Dabei wird insbesondere auf die sehr gering wasserdurchlässigen Gesteine der Unterkreide eingegangen, die die liegenden Formationen nach oben hin abschließen. Weiterhin wird auf die Besonderheiten des wasserführenden Hilssandsteins im Bereich des Schachtes Konrad 2 hingewiesen.

Daran anschließend werden die Abteufarbeiten der beiden Schächte detailliert dargestellt und der vorhandene Schachtausbau beschrieben. Insbesondere der zeitliche Ablauf von Ausbruch- und Sicherungsarbeiten wird genau herausgearbeitet.

2.2 Stellungnahme

Die Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wird vom NLFb beurteilt und hinreichend bestätigt. Das Abteufen der Schächte und der Ausbau werden lt. OBA folgerichtig beschrieben.

3. Konzept für die Verfüllung

3.1 Darstellung des Antragstellers

Die Aufgabe der Schachtverfüllung ist es, sowohl das Eindringen von Oberflächenwasser in das Endlager als auch das Austreten radionuklid belasteter Wässer aus dem Lager in die Biosphäre so gering wie möglich zu halten, auf jeden Fall aber auf ein bestimmtes zulässiges Maß zu begrenzen. Dieses Ziel soll durch folgendes Konzept erreicht werden:

Im Bereich des Quartärs und der Oberkreide (229 m im Schacht 1 bzw. 246 m im Schacht 2) ist eine Asphaltfüllung in beiden Schächten vorgesehen. Im unteren Teil der Oberkreide wird ein niedrigviskoser Asphalt eingebaut, um die Risse und Klüfte um die Schächte schnell zu verschließen. Darüber wird bis zum Schachtdeckel hochviskoser Asphalt eingefüllt, der langsamer und nur bis in begrenzte Tiefen in die Klüfte des Gebirges eindringt. Der Schachtausbau wird durch ein dichtes Raster von Bohrungen perforiert, um das Eindringen des Asphalts zu erleichtern. Am Übergang zur darunterliegenden Schachtverfüllung in der Unterkreide ist ein spezieller Aufbau des Asphalts - Viskosität von oben nach unten abnehmend - vorgesehen, der ein Abfließen des Asphalts nach unten verhindert.

Über die gesamte Höhe der Unterkreide (626 m im Schacht 1 bzw. 454 m im Schacht 2) erhalten die Schächte eine mineralische Verfüllung. Im einzelnen ist vorgesehen, von unten nach oben fortschreitend, den vorhandenen Schachtausbau herauszunehmen und gleichzeitig die schachtnahe Auflockerungszone (ca. 0,8 m) herauszufräsen. In möglichst kurzem Abstand der Aufweitung nachfolgend, wird der Schacht mit einem mineralischen Abdichtungsmaterial kraftschlüssig verfüllt. Die Kornverteilung des Materials wird so gewählt, daß es - sorgfältig verdichtet eingebaut - sowohl geringe Wasserdurchlässigkeit als auch hohe Steifigkeit und zeitunabhängiges Spannungsverformungsverhalten besitzt.

Um eine möglichst große Stützwirkung auf das Gebirge zu erreichen, wird der Reibungswinkel zwischen Verfüllmaterial und Gebirge dadurch sehr klein gehalten, daß eine Gleitschicht aus Ton zwischen Verfüllung und Gebirge eingebaut wird. Die Silowirkung setzt erst in einer gewissen Tiefe unter der temporären Füllsohle ein, wenn der Ton unter allseitigem Druck konsolidiert ist. Der Wandreibungswinkel stellt sich dann in der Größe des Restreibungswinkels des Tons ein ($\phi\text{-Rest} = 6^\circ$). Dieses Verfüllkonzept wird als Variante A bezeichnet.

Als Alternative hierzu wird Variante B beschrieben. Anstelle der Ton-Gleitschicht zwischen Kernverfüllung und Gebirge werden hochverdichtete, hochquellfähige Bentonitsteine eingebaut. Im Unterschied zu Variante A stellt sich hier sofort der Siloeffekt ein, so daß sich nur sehr geringe Vertikalspannungen im Füllmaterial und damit auch nur geringe horizontale Stützdrücke auf das Gebirge aufbauen können. Eine ausreichend große horizontale Verspannung der Füllsäule wird durch den Quelldruck der Bentonitsteine erzeugt. Der Beginn des Quellens kann durch den Zeitpunkt der Bewässerung der Steine gesteuert werden, der Quelldruck - Größe und Verlauf - durch Zusammensetzung des Bentonits, Größe der Steine und Größe der bewässerten Oberfläche.

Unterhalb der mineralischen Abdichtung werden die Schächte bis zu ihrer Endteufe mit einem Mineralgemisch mit möglichst dichter Lagerung und hoher Scherfestigkeit verfüllt. Die von den Schächten ausgehenden Strecken werden vor dem Abdichten der Schächte so verfüllt, daß ein Auslaufen der Füllsäule in die Strecken nicht möglich ist.

3.2 Stellungnahme

Die Herstellung einer mineralischen Füllsäule die sowohl eine dichte Lagerung als auch eine hohe Scherfestigkeit erreicht und die geeignet ist, als Stützsäule für die darüber angeordnete Abdichtung zu dienen, ist bautechnisch machbar und Stand der heutigen Technik.

Die Abdichtung Variante A im Bereich der Unterkreide ist herstellbar.

Die vorlaufende Aufweitung des alten Schachtes ist eine zweckmäßige Maßnahme, um die Auflockerungszone für den Endzustand klein zu halten und damit auch die Durchlässigkeit im schachtnahen Gebirge soweit wie möglich zu begrenzen. Die Größe der Aufweitung ist konstruktiv angemessen: Der Schachtquerschnitt bleibt in seiner Größe beherrschbar, die Zeiten für Ausbruch und Verfüllung und damit die Zeiten für fortschreitende Gebirgsauflockerung bleiben relativ kurz. Der am stärksten aufgelockerte Teil des Gebirgsrings um den Schacht wird herausgenommen.

Die Eigenschaften der Kernverfüllung, nämlich eine hinreichend kleine Wasserdurchlässigkeit und eine große Steifigkeit, bedeuten hohe Anforderungen an das Material. Gemäß [4] können diese Anforderungen erfüllt werden. Im Zuge der Ausführung sind übliche Qualitätskontrollen mit dem verwendeten Material durchzuführen.

Die Abdichtung Variante B mit Bentonitsteinen ist nach den Unterlagen [5], [6] und [7] grundsätzlich herstellbar. Form und Größe der Steine, Fugenbreite, Bewässerungssystem sowie der zeitliche Verlauf der Bewässerung bleiben in EU 438 offen. In EU 476 werden diese Punkte auf der Grundlage der o.g. Literatur näher beschrieben. Die Machbarkeit der Variante B ist damit nachgewiesen. Vor der Ausführung dieser Variante wären Versuche - wie vom Antragsteller bereits bemerkt - erforderlich, die auf die Randbedingungen des Projektes Konrad abgestimmt sind.

Insgesamt gesehen erscheint Variante A leichter beherrschbar als der schwieriger zu steuernde Quellmechanismus in Variante B.

Gegen die Herstellung der beschriebenen Asphaltichtung im obersten Schachtabschnitt bestehen in konstruktiver Hinsicht keine Bedenken. Es wird jedoch auf einen Schreibfehler auf Seite 3-3 in EU 438 hingewiesen: Das Dichtungssystem zwischen niedrigviskosem Asphalt und mineralischer Abdichtung besteht aus Asphalten, deren Viskosität von oben nach unten zunimmt (und nicht abnimmt, wie auf S. 3-3 beschrieben).

Hinweis:

Vor einer Realisierung der Variante B sind Ausführungsdetails durch Versuche, die die Randbedingungen der Schächte erfassen, zu erproben.

4. Auflockerungszone im Bereich der Unterkreide
für den bestehenden Zustand

4.1 Allgemeines, Nachweisgang

4.1.1 Darstellung des Antragstellers

Auf der Grundlage des Untersuchungsprogramms in den beiden Versuchsstrecken des Schachtes Konrad 2 wird der Dichtigkeitsnachweis der verfüllten Schächte wie folgt geführt:

- Der derzeitige Dehnungszustand des Gebirges wird durch FE-Berechnungen bestimmt.
- Anhand theoretischer Überlegungen zum Verformungs- und Rißverhalten des Gebirges wird eine Beziehung zwischen Dehnung und Wasserdurchlässigkeit hergeleitet.
- Mit den errechneten Dehnungszuständen und den in unterschiedlicher Entfernung vom Schacht gemessenen Wasserdurchlässigkeiten (WD-Tests) wird die hergeleitete Epsilon-kf-Beziehung geeicht.
- Der Dehnungszustand im verfüllten Zustand der Schächte wird mit FE-Berechnungen bestimmt.
- Mit der geeichten Dehnungs-Durchlässigkeitsbeziehung wird die Durchlässigkeit des Gebirges aus den errechneten Dehnungen für den Endzustand ermittelt.

4.1.2 Stellungnahme

Das dargestellte Konzept für den Nachweis hinreichender Dichtigkeit ist schlüssig und für eine quantitative Abschätzung der Durchlässigkeit geeignet.

4.2 Ergebnisse des Untersuchungsprogramms

4.2.1 Darstellung des Antragstellers

Auf der Grundlage der im Untersuchungsprogramm gemessenen felsmechanischen Kennwerte und Verformungsmessungen führt der Antragsteller Interpretationsberechnungen durch. Aus den gemessenen zeitabhängigen Gebirgsverschiebungen wird dabei die rechnerische Viskosität der Unterkreide bestimmt. Diese Viskositätswerte, in Kombination mit den übrigen felsmechanischen Kennwerten im Berechnungsmodell eingesetzt, liefern gute Näherungen der gemessenen Zeitverschiebungskurven.

Die Ergebnisse der von den Schächten aus durchgeführten WD-Tests sind in Abhängigkeit vom Abstand zur Schachtwand in den Abbildungen D-4.4 (343 m-Sohle) und D-4.5 (541 m-Sohle) von EU 438 dargestellt. Zur rechnerischen Erfassung der Beziehung zwischen Gebirgsdurchlässigkeit und Abstand zur Schachtwand legt der Antragsteller in beiden Darstellungen zwei Ersatzkurven für die breitgestreuten Durchlässigkeitswerte fest: Eine Kurve für obere Grenzwerte und eine für untere Grenzwerte der Durchlässigkeiten.

Die Kurven für die unteren Grenzwerte erfaßt in beiden Fällen (Apt und Barreme) näherungsweise die kleinsten gemessenen Durchlässigkeitswerte. Die Kurve für die oberen Grenzwerte liegt in beiden Fällen etwa mitten in der gesamten Bandbreite der Meßwerte, so daß die größten gemessenen Durchlässigkeiten um ca. eine Zehnerpotenz über der oberen Grenzkurve liegen. Der Antragsteller begründet diese Interpretation der Messungen damit, daß die Meßwerte infolge der Gebirgsauflockerung um das Bohrloch herum deutlich größer sind, als im Gebirge ohne Bohrlocheinfluß. Der Nachfall in den Horizontalbohrungen wird durch Bohrlochfotos und eine FE-Berechnung belegt.

4.2.2 Stellungnahme

Die vom Antragsteller ermittelten felsmechanischen Kennwerte für das Mittelalb liegen in der gleichen Größenordnung, wie die in den Erläuternden Unterlagen EU 81.1 und 99.2 hierfür angegebenen Werte bzw. sind eher etwas konservativer als diese (etwas kleinere Scherparameter in EU 438). Für das Barreme weist das Untersuchungsprogramm etwas größere Kohäsionswerte (3,0 - 4,0 im Vergleich zu 1,0 - 2,0 MN/m²) und kleinere Reibungswinkel (10° - 15° im Vergleich zu 20° - 25°) aus als die o.g. Unterlagen. Für den relevanten Spannungsbereich entsprechen die kleineren Scherparameter von EU 438 etwa den Werten von EU 81.1 und 99.2.

Die gemessenen Primärspannungen (Mittelalb $K_0 = 0,5$, Barreme $K_0 = 0,6$) entsprechen den Ansätzen in den übrigen Unterlagen zu Konrad.

Gegen die Ermittlung einer rechnerischen Viskosität des Gebirges aus gemessenen Verformungsverläufen bestehen keine grundsätzlichen Einwände. Die mit diesen Ansätzen erzielten Ergebnisse liegen in realistischer Größenordnung.

Die Idealisierung der gemessenen Durchlässigkeitswerte auf eine obere und eine untere Grenzkurve ist nachvollziehbar und plausibel.

Die ermittelten Durchlässigkeitswerte werden vom NLfB als plausibel bewertet.

4.3 Die Gebirgsdehnungs-Durchlässigkeitsbeziehung

4.3.1 Darstellung des Antragstellers

Auf der Grundlage theoretischer Betrachtungen der Zusammenhänge zwischen der Öffnung und Verteilung von kleinen Rissen und den Dehnungsänderungen im Gebirgskörper leitet der

Antragsteller nach Wittke [1] eine Beziehung zwischen dem Dehnungszustand und der Wasserdurchlässigkeit im Gebirge für elastische Zustände und für plastische Zustände her. Als Stoffkennwerte für diese beiden Epsilon-kf-Gleichungen gehen jeweils zwei Parameter ein.

4.3.2 Stellungnahme

Die vom Antragsteller zugrunde gelegte Modellvorstellung für die Durchlässigkeits-Dehnungsbeziehung ist akzeptabel. Die hergeleiteten Dehnungs-Durchlässigkeitsbeziehungen sind formal richtig. Gegen ihre Verwendung zur Abschätzung der Größenordnung von Durchlässigkeiten bestehen keine Bedenken.

4.4 Berechnungen zum bestehenden Zustand der Schächte

4.4.1 Darstellung des Antragstellers

Im Kapitel 4.4 erläutert der Antragsteller die Berechnung des derzeitigen Spannungsdehnungszustandes des Gebirges und der Schachtauskleidung für zwei Fälle:

- A) in 350 m und
- B) in 550 m Tiefe.

Die gewählten E-Moduln liegen in beiden Fällen an der unteren Grenze der gemessenen Werte ($E = 2000 \text{ MN/m}^2$).

Die Scherfestigkeit wird im Fall A mit dem Reibungswinkel $\phi = 15^\circ$ und der Kohäsion $c = 2,0 \text{ MN/m}^2$ angesetzt, was dem oberen Bereich der gemessenen Werte entspricht.

Im Fall B wählt der Antragsteller ebenfalls Scherparameter, die an der oberen Grenze der angegebenen Streubreite liegen.

Die gewählten Viskositäten betragen 3×10^7 (A) bzw. 1×10^7 MNs/m^2 (B) und liegen damit für Fall A an der oberen und für Fall B an der unteren Grenze der Streubreite.

Der Baufortschritt wird im Berechnungsmodell durch Aus- und Einbau von entsprechenden Elementen und durch Stillstandszeiten mit fortschreitender Spannungsumlagerung (viskoplastisches Stoffgesetz) simuliert.

Als Ergebnis der FE-Berechnungen werden die Gebirgsspannungen und -Dehnungen im Bereich des Schachtes dargestellt. Der Schachtausbau wirkt demnach mit einem Stützdruck von 0,8 (Fall A) bzw. 0,6 MN/m² (Fall B) auf das Gebirge. Die Dicke der plastischen Zonen am Schachtrand beträgt im Fall A 2,35 m und im Fall B 1,35 m.

Weiterhin ermittelt der Antragsteller für die hergeleiteten Epsilon-Kf-Gleichungen sowohl für den elastischen als auch für den plastischen Bereich (vgl. Abschnitt 4.3) die jeweils zwei Stoffkennwerte. Dazu werden die errechneten Dehnungen und die gemessenen Durchlässigkeitswerte (WD-Tests im Versuchsprogramm) für jeweils drei Punkte im Gebirge in die Gleichungen eingesetzt und die Formeln nach den Parametern aufgelöst.

Die Auswertung der Epsilon-Kf-Gleichungen mit den ermittelten Parametern wird in den Abbildungen D-4.23 und D-4.24 von EU 438 als Kurve des Durchlässigkeitsverlaufs in Abhängigkeit vom Abstand zur Schachtwand dargestellt. Darin sind für die Fälle A und B jeweils eine obere und eine untere Grenze für die Durchlässigkeitswerte aufgetragen.

4.4.2 Stellungnahme

Die vom Antragsteller für die Spannungs-Dehnungsberechnung gewählten Scherparameter liegen an der oberen Grenze der Streubreite der gemessenen Werte. Hieraus resultieren eher zu kleine plastische Zonen und damit zu kleine Dehnungen. Gleichzeitig wird mit einem relativ kleinen Elastizitätsmodul gerechnet, der eher zu größeren Dehnungen führt. Für die Umsetzung der errechneten Dehnungen in Durchlässigkei-

ten sind diese Ansätze jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die Epsilon-Kf-Beziehung an gemessenen Durchlässigkeiten geeicht wird und damit für den bestehenden Zustand zwangsläufig Durchlässigkeitskurven ermittelt werden, die mit den idealisierten Durchlässigkeitskurven aus dem Versuchsprogramm unabhängig vom Dehnungszustand weitgehend übereinstimmen (Abb. D-4.4 und D-4.5 in EU 438). Für die Prognose der Gebirgsdurchlässigkeiten nach Schachtaufweitung und Verfüllung sind dieselben felsmechanischen Kennwerte zu verwenden, wie bei der Ermittlung des bestehenden Zustandes, was der Antragsteller auch tut.

Die Überprüfung der errechneten Spannungs-Dehnungszustände ergab keine Beanstandung.

Die ermittelten Spannungen und Dehnungen liegen innerhalb realistischer Größenordnung. Die den ermittelten Dehnungszuständen im Gebirge zugeordneten Durchlässigkeiten sind hiervon unabhängig, da sie an gemessenen Epsilon-Kf-Werten geeicht sind. Insofern geht der Antragsteller von Durchlässigkeiten in realistischer Größenordnung aus.

5. Mineralische Abdichtung im Bereich der Unterkreide,
Variante A

5.1 Gang der Berechnungen zum verfüllten Zustand der Schächte

5.1.1 Darstellung des Antragstellers

Das Ziel der Berechnung ist es, den Dehnungszustand im den Schacht umgebenden Gebirge zu bestimmen, um daraus die Durchlässigkeit der Auflockerungszone abzuschätzen. Im einzelnen werden hierfür die folgenden Berechnungsschritte durchgeführt:

- FE-Berechnung des Spannungs-Dehnungszustandes im Gebirge für zwei Tiefenlagen (Fall A: Apt, 350 m, Fall B: Barreme 550 m). Die Berechnung geht von dem bisher errechneten derzeitigen Zustand unter Berücksichtigung des Bauablaufs aus. Der Bauablauf wird wie folgt erfaßt: Aufweitung des Querschnittes, Standzeit der ungesicherten Schachtwand, zeitabhängige, lineare Zunahme des Stützdrucks des Kerns bis zu einem Höchstwert von 1,1 MN/m². Die angesetzten felsmechanischen Kennwerte stimmen mit den in den vorangegangenen Berechnungen des derzeitigen Zustands überein.
- Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Radialverschiebung und Radialspannung an der Schachtausbruchsfläche aus der FE-Berechnung, dargestellt als Kennlinie des Gebirges für beide Fälle.
- Ermittlung der Kennlinien für Radialspannung/Radialverformung für das Füllmaterial und für die Tongleitschicht zwischen Kernfüllung und Gebirge.
- Zusammensetzen der drei Kennlinien und Bestimmung des endgültigen Stützdruckes auf das Gebirge aus der Wechselwirkung der Kennlinien.

5.1.2 Stellungnahme

Der Gang der Berechnung ist nachvollziehbar und schlüssig.

5.2 Bodenmechanische Kennwerte der Verfüllmaterialien

5.2.1 Darstellung des Antragstellers

Die bodenmechanischen Kennwerte des Füllmaterials und des Tones, der als Gleitschicht zwischen Gebirge und Füllkern vorgesehen ist, sind in EU 438 Abb. D-5.8 dargestellt.

Für die Böden werden u.a. angegeben:

		Kernverfüllung	Ton
Durchlässigkeitsbeiwert	Kf m/s	< 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Reibungswinkel	phi °	43	10
Kohäsion	c kN/m ²	27	50

Für den Steifemodul der beiden Lockergesteine gibt der Antragsteller eine spannungsabhängige Gleichung an:

$$E_s = V_e \times \sigma + E_{s0}$$

mit V_e = Kompressionsbeiwert und E_{s0} = Anfangssteifemodul.

5.2.2 Stellungnahme

Die bodenmechanischen Kennwerte der Kernverfüllung basieren gemäß Antragsteller auf Untersuchungen der Dyckerhoff + Widmann AG, [4].

Die für den Ton gewählten Kennwerte entsprechen den üblichen Werten für ausgeprägt plastische Tone.

5.3 Spannungen und Verformungen in der Gleitschicht aus Ton

5.3.1 Darstellung des Antragstellers

Die Gleitschicht aus Ton wird im wassergesättigten, unkonsolidierten Zustand eingebaut. Auf diese Weise wirkt als Scherfestigkeit zwischen Kernfüllung und Gebirge zunächst nur die undrainierte Scherfestigkeit $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$, so daß die Vertikalspannung in der Schachtfüllung nur geringfügig durch den Siloeffekt verringert wird. Dadurch nimmt auch der Seitendruck in der Auffüllung mit der Tiefe zu und der Ton konsolidiert. Unter der Annahme, daß der Seitendruck bis auf $1,1 \text{ MN/m}^2$ anwächst, errechnet der Aufsteller eine Stauchung der Dicke der Tonschicht von 10 mm. Die Konsolidationszeit der Tonschicht wird in Abhängigkeit von der Konsolidationsspannung angegeben.

5.3.2 Stellungnahme

Die für die Tonschicht errechnete Zusammendrückung ist für die gewählten Eingangsparameter richtig. Die zwischen Konsolidationszeit und Konsolidationsspannung angegebene Beziehung stimmt mit den hierfür bekannten Beziehungen [2] überein.

5.4 Spannungen und Verformungen im Kern

5.4.1 Darstellung des Antragstellers

Die Spannungen im Verfüllungskern hängen in erster Linie von den bodenmechanischen Kennwerten des Füllmaterials und von der Reibung zwischen Kern und Gebirge (Gleitschichtwirkung) ab. Wegen der anfangs geringen Scherfestigkeit der Gleitschicht steigt die Vertikalspannung im Füllmaterial zunächst linear mit der Verfüllhöhe an, bis mit zunehmender

Konsolidation des Tons die Reibung im Ton aktiviert wird und auf diese Weise die Vertikalspannungen zum Teil in das Gebirge eingeleitet werden.

Zur Ermittlung der effektiven Konsolidationszeit trägt der Antragsteller die effektiv konsolidierend wirkende Horizontalspannung über der Zeit auf. Näherungsweise wird hierfür der Mittelwert der dreieckförmigen Spannungsverteilung angesetzt. Dieser Mittelwert wächst, dem kontinuierlichen Baufortschritt entsprechend, linear um $0,5 \times 0,027 \text{ MN/m}^2$ pro Tag an (3 m Schütthöhe/Tag, $K_0 = 0,5$, c_u berücksichtigt), EU 438, Abb. D-5.12. In dasselbe Diagramm ist die Funktion der Konsolidationsspannung über der Zeit eingetragen.

Der Schnittpunkt der beiden Kurven gibt die Konsolidationszeit mit 38 Tagen an. Die zugehörige mittlere Radialspannung beträgt $0,51 \text{ MN/m}^2$. In der Realität wird mit einer deutlich längeren Konsolidationszeit gerechnet, weil die Horizontalspannung linear ansteigt und nicht von Anfang an $0,51 \text{ MN/m}^2$ beträgt.

In 38 Tagen wird eine Schütthöhe von $3 \times 38 = 114 \text{ m}$ und damit eine Vertikalspannung von $2,05 \text{ MN/m}^2$ erreicht. Auf diesen oberen 114 m rechnet der Antragsteller mit der Silowirkung infolge undrainierter Scherfestigkeit ($c_u = 10 \text{ kN/m}^2$), unterhalb mit der Silowirkung infolge des Restreibungswinkels des Tons ($\phi = 6^\circ$). Hieraus ergeben sich der Vertikal- und der Horizontalspannungsverlauf für eine unverschiebliche Schachtwand. Als Seitendruckbeiwert für das Füllmaterial setzt der Antragsteller 0,5 ein.

Zur Erfassung der Wechselwirkung zwischen Kern, Gleitschicht und Gebirge wird auch für den Kern eine Kennlinie ermittelt.

Die für diese Spannungs-Verformungsbeziehung zugrunde gelegte Gleichung lautet

$$d_{rk} = \frac{(1-\nu)^2 (\sigma_r - \sigma_{ro}) \cdot R}{(1-\nu-2\nu^2) [E_{s0} + V_e \left(\frac{1-\nu}{1+\nu}\right) (2\sigma_r + \sigma_z)]}$$

Im Diagramm der Spannungsverformungsbeziehung werden der aktive und der passive Erddruck als Grenzwerte des elastischen Verhaltens angegeben.

5.4.2 Stellungnahme

Die Berechnung der Spannungsverteilung im Verfüllungskern entspricht üblichen Spannungsberechnungen nach der Elastizitätstheorie. Die Silowirkung wird dabei sowohl im oberen als auch im unteren Bereich (Cu- bzw. phi-Wirkung) zutreffend berücksichtigt.

Den Seitendruckbeiwert ermittelt der Antragsteller gemäß Elastizitätstheorie aus der Querdehnzahl des Materials. Diese nimmt er zu 0,33 an. Daraus resultiert ein Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$.

Nach den Ansätzen der Bodenmechanik ergibt sich für das beschriebene Material ein Seitendruckbeiwert von $K_0 = 1 - \sin 43^\circ = 0,32$. Im Sinne einer konservativen Dichtigkeitsabschätzung und da es sich hierbei um bodenmechanische Zusammenhänge handelt, sollte eher der kleinere Seitendruckbeiwert zugrunde gelegt werden.

Nach eigener Berechnung führt der Ansatz eines verringerten Seitendrucks zu einer Konsolidationszeit der Tonschicht von 51 Tagen, was einer Schütthöhe von $3 \times 51 = 153$ m entspricht, vgl. Anlage 1. Der Verlauf der Horizontalspannung im Füllmaterial ändert sich dadurch insofern, als er erst in 153 m Tiefe einen Wert von 0,9 MN/m² anstatt 1,0 kN/m² in 114 m Tiefe erreicht.

In größerer Tiefe strebt die Vertikalspannung für $K_0 = 0,32$ nun gegen einen Endwert von $4,34 \text{ MN/m}^2$ anstatt $3,07 \text{ MN/m}^2$ und die Horizontalspannung strebt gegen einen Endwert von $1,39$ anstatt $1,54 \text{ MN/m}^2$. Der für die Größe der Auflocke-
rungszone wesentliche Horizontaldruck weicht unter Berücksichtigung von $K_0 = 0,32$ demnach um 10% von dem für $K_0 = 0,5$ errechneten Wert ab, vgl. Anlage 2. Eine Abweichung in dieser Größenordnung liegt innerhalb der Streubreite der Rechenansätze und der Ergebnisse und ist daher akzeptabel.

Die für die Radialverformung zugrunde gelegte Gleichung gilt - wie vom Antragsteller bereits auf S. 5 - 12 ange-
merkt - genau genommen nur für den ebenen Spannungszustand. Der Kern verhält sich jedoch - vom oberen freien Rand abge-
sehen - nach den Gleichungen für den ebenen Verformungszu-
stand (behinderte Querdehnung). Die Gegenüberstellung bei-
der Gleichungen ergibt für $\nu = 0,33$ den folgenden Unter-
schied:

ebener Spannungszustand:

$$d_{rk} = \frac{(1 - \nu)^2}{(1 - \nu - 2\nu^2) \times E_s} \times \Delta \sigma_r \times R = 1,0 \times \frac{\Delta \sigma_r \times R}{E_s} \quad (1)$$

ebener Verformungszustand:

$$d_{rk} = \frac{1 - \nu}{E_s} \times \Delta \sigma_r \times R = 0,67 \times \frac{\Delta \sigma_r \times R}{E_s} \quad (2)$$

Des weiteren rechnet der Antragsteller mit einem Steifemo-
dul, in dem der Kompressionsbeiwert ν mit der Summe der
drei Hauptspannungen und mit $0,5$ (für $\nu = 0,33$) multipli-
ziert wird:

Füllmaterial (Abb. D-5.15):

$$E_S = E_{SO} + V_e \times \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)} \times (2 \sigma_r + \sigma_z) \quad (3)$$

Für die Bestimmung des aktuellen Steifemoduls für den Ton und bei der Bestimmung des Steifemoduls für dasselbe Füllmaterial im Kapitel 6 wird das Stoffgesetz jedoch wie folgt formuliert und angewendet:

Ton (Abb. D-5.10): $E_S = E_{SO} + V_e \times \sigma_r \quad (4)$

Füllmaterial (Abb. D-6.5): $E_S = E_{SO} + V_e \times \sigma_r \quad (5)$

Ein Vergleich der Radialverschiebungen des Füllkerns nach der vom Antragsteller zugrunde gelegten Beziehung und nach der üblichen Gleichung (2) und (5) unter Ansatz eines Seitendruckbeiwertes von 0,32 zeigt, daß die Unterschiede in den beiden Formeln sich weitgehend ausgleichen, vgl. Anlage 3:

Spannung σ_r MN/m ²			4		0,5		0,8	
			a)	b)	a)	b)	a)	b)
Fall A	d_{rk}	cm	5,0	5,0	3,3	2,3	-----	
Fall B	d_{rk}	cm	4,0	4,0	-----		2,8	3,5

Tabelle 5.1:

Radialverschiebungen a) nach EU 438 und b) nach eigenen Ansätzen ($K_0 = 0,32$, ebener Verformungszustand, $E_S = E_{SO} + V_e \times \sigma_r$)

Für die praktische Abschätzung der Spannungen und Verformungen im System Gebirge - Gleitschicht - Kernfüllung führt die vom Antragsteller verwendete Beziehung trotz der theoretisch nicht ganz zutreffenden Ansätze mit den gewählten Zahlenwerten zu hinreichend zutreffenden Ergebnissen.

5.5 Wechselwirkung zwischen Kern, Gleitschicht und Gebirge

5.5.1 Darstellung der Antragstellers

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten Kennlinien für das Gebirge, die Tongleitschicht und den Füllkern ermittelt der Antragsteller durch Zusammensetzen der Kennlinien den Verformungszustand, der sich nach Abschluß der Schachtverfüllung einstellt. Demnach ergibt sich in ca. 350 m Tiefe (Abt) eine Radialspannung zwischen Kern und Gebirge von 1,24 MN/m² und eine radiale Zusammendrückung des Kerns von 4,2 mm, vgl. Anlage 4. Unter Berücksichtigung der Zusammendrückung der Tonschicht von 9,2 mm beträgt die nach innen gerichtete Verschiebung der Schachtwand 13,4 mm nach Beginn der Verfüllung.

In 550 m Tiefe ergibt sich ein Gleichgewichtszustand bei einer Radialspannung von 1,15 MN/m², einer Ausdehnung des Kerns um 12,8 mm, einer Zusammendrückung der Tonschicht um 9,1 mm und einer Schachtwandverschiebung in das Gebirge hinein von 3,7 mm, vgl. Anlage 5.

5.5.2 Stellungnahme

Für die vom Antragsteller zugrunde gelegten Kennlinien ($K_0 = 0,5$, ebener Spannungszustand für den Kern usw.) sind die ermittelten Spannungen und Verformungen für den Gleichgewichtszustand im Schacht für beide Fälle richtig ermittelt. Zum Vergleich sind die im vorangegangenen Abschnitt ermittelten korrigierten Kennlinien (für $K_0 = 0,32$, ebener Ver-

formungszustand für den Kern usw.) in denselben Diagrammen gepunktet aufgetragen, vgl. Anlage 4 und 5. Demnach ergeben sich folgende Abweichungen:

	sigma _r MN/m ²		d _{rk} mm		d _{rG} mm	
	a)	b)	a)	b)	a)	b)
Fall A	1,24	0,81	4,2	6,0	13,4	15,0
Fall B	1,15	1,11	-12,8	-12,7	-3,7	-3,7

- sigma_r = Radialspannung zwischen Kern und Gebirge
- d_{rk} = Radialverschiebung des Kernrandes
- d_{rG} = Radialverschiebung der Schachtwand, positiv in das Schachtinnere gerichtet

Tabelle 5.2:

Vergleich der Gleichgewichtszustände im Schacht a) nach EU 438 und b) nach eigener Berechnung mit u.a. Ko = 0,32.

Die etwas längere Zeit bis zum Erreichen des endgültigen Stützdruckes für Ko = 0,32 wurde in der eigenen ergänzende Berechnung vernachlässigt.

Der Vergleich in Tabelle 5.2 zeigt, daß die Ergebnisse des Antragstellers teilweise von den eigenen Ergebnissen abweichen. Die Abweichungen sind jedoch als klein zu bewerten. Die ermittelten Gleichgewichtszustände sind realistisch und liegen innerhalb der zu erwartenden Größenordnung von Spannungen und Verschiebungen.

5.6 Anstieg des Grundwassers

5.6.1 Darstellung des Antragstellers

Im derzeitigen Zustand sind die Unterkreideschichten zwar näherungsweise wassergesättigt, der Nahbereich der Schächte steht jedoch nicht unter Auftrieb.

Im Verlauf langer Zeiträume ist damit zu rechnen, daß das Grundwasser ansteigt und die verfüllten Schächte unter Auftrieb geraten. Die totalen Spannungen ändern sich hierdurch kaum, die effektiven Spannungen nehmen sowohl im Gebirge als auch in der Verfüllung ab, so daß die gegenseitigen Einwirkungen von Kern und Gebirge im Gleichgewicht bleiben. Der Anstieg des Grundwassers hat demzufolge keinen Einfluß auf den Dehnungszustand und die Durchlässigkeit.

5.6.2 Stellungnahme

Die Feststellung des Antragstellers, daß der Anstieg des Grundwassers keinen Einfluß auf die Durchlässigkeit der verfüllten Schächte hat, ist zutreffend.

6. Mineralische Abdichtung, Variante B

6.1 Quelleigenschaften hochverdichteter Bentonite

6.1.1 Darstellung des Antragstellers

Als Alternativlösung zur Schachtverfüllung mit einer Gleitschicht aus Ton zwischen Kernverfüllung und Gebirge ist die "Variante B" vorgesehen. Hierfür wird die grundsätzliche Durchführbarkeit - ohne Detailuntersuchungen - nachgewiesen.

Anstelle der Tongleitschicht sind in "Variante B" hochquellfähige Bentonitformstücke vorgesehen. Auf der Grundlage der Literaturquellen [5], [6] und [7] gibt der Antragsteller die maßgebenden Quellparameter an. Demnach kann das Material je nach Dichte Quelldrücke von 17 bis über 40 MN/m² und Quellhebungen bis über 60 % haben.

6.1.2 Stellungnahme

Gemäß [5], [6] und [7] sind die vom Antragsteller zugrunde gelegten Quelldrücke und Hebungen zutreffend.

6.2 Spannungen und Verformungen im Kern

6.2.1 Darstellung des Antragstellers

Wie bereits für "Variante A" wird der Spannungs-Dehnungszustand des verfüllten Schachtes nach dem Kennlinienverfahren bestimmt. Die Kennlinie für den Kern ist wegen des angesetzten Stoffgesetzes nichtlinear. Als Ausgangszustand im Kern ergibt sich für einen Seitendruckbeiwert von 0,5 eine Radialspannung von 0,3 MN/m² und eine

Vertikalspannung von 0,6 MN/m². Für die Ermittlung des Spannungs-Dehnungszustandes wird der ebene Verformungszustand zugrunde gelegt.

6.2.2 Stellungnahme

Die vom Antragsteller zugrunde gelegten Gleichungen zur Bestimmung der Kennlinie sind richtig.

Der angesetzte Seitendruckbeiwert von 0,5 ist für das verwendete Material zu groß. Für den eher zutreffenden Wert von $K_0 = 0,32$ (vgl. Abschnitt 5.4.2) ergibt sich zwar eine größere Vertikalspannung (0,96 anstatt 0,58 MN/m²), aber eine ebenso große Radialspannung, wie vom Antragsteller mit 0,5 errechnet ($0,96 \times 0,32 = 0,31$ MN/m²). Die angegebene Kennlinie für den Füllkern ist daher rechnerisch richtig.

6.3 Kennlinie des Gebirges

6.3.1 Darstellung des Antragstellers

Als Kennlinie für das Gebirge wird die im Kapitel 5.1 der Unterlage für "Variante A" ermittelte Spannungs-Verformungsbeziehung angenommen. Vereinfachend wird dabei von derselben zeitlichen Stützdruckentwicklung wie bei "Variante A" ausgegangen.

6.3.2 Stellungnahme

Gegen die Übernahme der Kennlinie von "Variante A" bestehen keine Bedenken.

6.4 Wechselwirkung zwischen Kern, Bentonitring und Gebirge

6.4.1 Darstellung des Antragstellers

Die Überlagerung der Kennlinien für Gebirge, Kernfüllung und quellendem Bentonitring zeigt, daß sich bei "Variante B" in 350 m Tiefe ein Gleichgewichtszustand bei einer Radialspannung von 4,0 MN/m² (Bentonitdichte 1,8 g/cm³) und einer zum Schachtinneren gerichteten Radialverschiebung von 4,8 mm einstellt. Der Vergleich mit "Variante A" zeigt, daß mit "Variante B" kleinere Entspannungsverschiebungen des Gebirges und damit auch kleinere Durchlässigkeiten erreichbar sind.

6.4.2 Stellungnahme

Für die vom Antragsteller angenommenen Quellverformungen und Quelldrücke für die Bentonitpackung sind mit der Abdichtungsvariante B kleinere Durchlässigkeiten erzielbar als mit der Variante A.

Die Steuerung der Quelldrücke der Bentonitformsteine, die Größe und Form der Steine sowie andere Details (z.B. Bewässerungssystem) wären ggfs. vor der Ausführung durch ergänzende Versuche auf die Randbedingungen des Projekts Konrad abzustimmen.

7. Nachweis der Dichtigkeit der verfüllten Schächte

7.1 Anforderungen an die Dichtigkeit der verfüllten Schächte

7.1.1 Darstellung des Antragstellers

Im Berechnungsfall R 35 für die Grundwasserbewegung und die Radionuklidausbreitung setzt die Colenco AG für die Schacht- und die Auflockerungszonen einen Durchlässigkeitswert von 1×10^{-8} m/s und eine Gesamtquerschnittsfläche von je Schacht 230 m² an. Daraus resultiert als Dichtigkeitsanforderung an die Schächte eine mittlere Transmissivität von $< = 2,3 \times 10^{-6}$ m³/s.

7.1.2 Stellungnahme

Gegen die Nachweisführung bestehen keine Einwände.

7.2 Transmissivität der verfüllten Schächte

7.2.1 Darstellung des Antragstellers

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert für die mineralische Abdichtung und den Ton beträgt $K_f < = 1 \times 10^{-10}$ m/s, der des Bentonitringes etwa 10^{-13} m/s. Daraus resultiert für die Schachtfüllungen für beide Varianten eine vernachlässigbar kleine Transmissivität von ca. $0,8 \times 10^{-8}$ m³/s.

7.2.2 Stellungnahme

Die angegebenen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte für die mineralische Abdichtung, den Ton und die Bentonitformsteine sind nach heutigem Stand der Technik erreichbar. Sie entsprechen den Angaben in [4] bis [7].

7.3 Transmissivität der Auflockerungszone im Bereich der Versuchsstrecken

7.3.1 Darstellung des Antragstellers

Unter Berücksichtigung des Baufortschritts und eines im Endzustand wirkenden Stützdruckes auf die Schachtwände von 1,1 MN/m² errechnet der Antragsteller die Spannungs-Dehnungszustände im Gebirge für die Fälle A (350 m Tiefe) und B (550 m Tiefe). Aus diesen Dehnungszuständen wird mit Hilfe der in Kapitel 4 der Unterlage hergeleiteten und gezeichneten Epsilon-Kf-Beziehung die Durchlässigkeit in der Auflockerungszone bis in eine Tiefe ermittelt, in der die Dehnungen so klein sind, daß die zugehörigen Durchlässigkeiten $< 1 \times 10^{-10}$ m/s sind. Für beide Fälle A und B wird dabei der obere und der untere Grenzwert der Durchlässigkeiten dargestellt. Im Fall A werden dabei Durchlässigkeiten an der Schachtwand von ca. $2,6 \times 10^{-9}$ bis $2,6 \times 10^{-8}$ m/s, im Fall B von $2,0 \times 10^{-9}$ bis $2,0 \times 10^{-8}$ m/s erreicht.

Die Integration der Durchlässigkeitsverteilung über die Tiefe der Auflockerungszone liefert Transmissivitäten von:

Fall A: $3,2 \times 10^{-7}$ bis $3,3 \times 10^{-6}$ m³/s

Fall B: $1,4 \times 10^{-7}$ bis $1,6 \times 10^{-6}$ m³/s.

7.3.2 Stellungnahme

Die Prüfung der ermittelten Spannungs-Dehnungszustände ergab keine Beanstandungen. Die angesetzten radialen Stützdrücke auf das Gebirge von 1,1 MN/m² entsprechen etwa den vom Aufsteller in Kapitel 5 errechneten Stützdrücken von 1,24 bzw. 1,15 MN/m².

Nach eigener Untersuchung mit einem Seitendruckbeiwert von 0,32 für das Füllmaterial ergeben sich Stützdrücke von 0,8 bzw. 1,14 MN/m², vgl. Anlage 4 und 5. Die Auflockerungszone

und die oberflächennahen Dehnungen im Fall A ergeben sich danach etwas größer als für den zugrunde gelegten Seitendruckbeiwert. Die Abweichungen liegen jedoch innerhalb der Streubreite, die bei der Übertragung der Rechenergebnisse auf die Realität anzunehmen ist und können daher vernachlässigt werden.

Die Ermittlung der Durchlässigkeitsverteilung aus den Dehnungszuständen nach den Gleichungen des Antragstellers ist rechnerisch richtig. Ein direkter Vergleich dieser Durchlässigkeiten für den Endzustand mit den im derzeitigen Zustand direkt gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerten zeigt, daß die errechneten Werte für den Endzustand im Fall A nur wenig über den derzeitigen Werten liegen und im Fall B bereichsweise gleich groß, bereichsweise größer sind. Im Hinblick auf die schonende Aufweitung des Schachtes und die schnelle kraftschlüssige Verfüllung sind die vom Antragsteller ermittelten Durchlässigkeitsverteilungen für den Endzustand demnach rechnerisch hinreichend zutreffend und dem o.g. Vergleich nach plausibel.

Die Prüfung der aus den o.g. Durchlässigkeiten errechneten Transmissivitäten ergab keine Beanstandung.

7.4 Mittlere Transmissivität der verfüllten Schächte im Bereich der Unterkreide

7.4.1 Darstellung des Antragstellers

Aufgrund der Homogenität der oberen und der unteren Unterkreide können die Untersuchungen für die 350 m Sohle (Fall A) auf die Schichtenfolge des Alb und des Apt und die der 550 m Sohle (Fall B) auf die Schichten des Barreme und Hauterive übertragen werden. Unter dieser Voraussetzung kann aus den im vorangegangenen Kapitel errechneten Transmissivitäten eine mittlere Transmissivität für die gesamte Unterkreide angegeben werden. Als unterer Grenzwert ergibt

sich $2,0 \times 10^{-7}$ m³/s, als oberer Grenzwert $2,4 \times 10^{-6}$ m³/s. Der in der Berechnung angesetzte Wert beträgt $2,3 \times 10^{-6}$ m³/s.

7.4.2 Stellungnahme

Die angegebenen mittleren Transmissivitäten sind richtig errechnet und sind kleiner oder gleich groß wie der in der Modellrechnung R 35 angesetzte Wert. Damit ist der quantitative Nachweis einer ausreichenden Dichtigkeit der Schächte in der Nachbetriebsphase erbracht.

8. Stützsäule

8.1 Materialeigenschaften

8.1.1 Darstellung des Antragstellers

Als Material der Stützsäule unter der mineralischen Abdichtung ist ein fein abgestuftes Gemisch aus Steinmehl und Feinbrechsand, Brechsand, Splitt und Schotter vorgesehen. Damit erreicht die Stützsäule bei guter Verdichtung eine relativ geringe Wasserdurchlässigkeit ($< 10^{-4}$ m/s), eine große Scherfestigkeit und einen Steifemodul von 100 bis 200 MN/m².

8.1.2 Stellungnahme

Die Zusammenstellung eines Füllmaterials mit den genannten Eigenschaften ist Stand der Technik.

8.2 Spannungen in der Stützsäule und erdstatische Nachweise

8.2.1 Darstellung des Antragstellers

In der Stützsäule stellt sich infolge der Lastabtragung in die Schachtwände eine Vertikalspannung von ca. 0,13 MN/m² ein, die ohne weiteres vom Füllmaterial aufgenommen werden kann.

Der Horizontaldruck aus der Stützsäule wirkt auf den Versatz in den vom Schacht abgehenden Strecken. Der Antragsteller weist nach, daß dieser Horizontaldruck vom Versatz in das Gebirge abgetragen werden kann.

Zwischen Stützsäule und mineralischer Abdichtung ist ein Filter vorgesehen, der die Erosion feinkörniger Bestandteile aus der Abdichtung in die Stützsäule verhindert.

8.2.2 Stellungnahme

Die Prüfung der Standsicherheitsnachweise für die Stützsäule und für den Versatz in den vom Schacht abgehenden Strecken ergab keine Beanstandung.

Die Herstellung einer Filterschicht zum Erosionsschutz der mineralischen Abdichtung ist Stand der Technik.

9. Ausführung der Schachtverfüllung

9.1 Allgemeines

9.1.1 Darstellung des Antragstellers

Die Verfüllung der Schächte beginnt mit dem Rauben aller Schachteinbauten. Anschließend wird die Stützsäule vom Schachttiefsten bis zur Unterkante der Unterkreide eingebaut. Im Zuge dieser Arbeiten werden die vom Schacht abgehenden Strecken verdämmt. Auf der Stützsäule aufbauend wird eine Schachtfräse eingerichtet, die im Bereich der Unterkreide die Schachtausmauerung und die oberflächennahe Auflockerungszone herausfräst und den Schacht auf 10 m Durchmesser aufweitet. Der Einbau der mineralischen Abdichtung folgt in kurzem Abstand. Im Bereich der Hilssandsteinbank werden vorab besondere Abdichtungsmaßnahmen getroffen.

9.1.2 Stellungnahme

Gegen den vorgesehenen Arbeitsablauf der Verfüllung bestehen keine Bedenken.

9.2 Einbau der Stützsäule

9.2.1 Darstellung des Antragstellers

Der Einbau der Stützsäule erfolgt lagenweise in Schritten von 40 cm mit Verdichtung. Bei Erreichen von Schachtzugängen wird die Strecke bis an den dann bereits vorhandenen Streckenversatz mit verfüllt. Dabei wird die Strecke bis an die Firste mit geneigten Lagen verfüllt. Zwischen vorhandenem Streckenversatz und Restverfüllung mit Schottergemisch wird ein zweistufiger Filter eingebaut.

9.2.2 Stellungnahme

Gegen den geplanten Einbau der Stützsäule bestehen in statischer und konstruktiver Hinsicht keine Bedenken.

9.3 Aufweitung der Schächte, Einbau der mineralischen Abdichtung

9.3.1 Darstellung des Antragstellers

Im Bereich der Unterkreide wird der Schacht mit einer Schachtfräse von unten nach oben auf 10 m Durchmesser aufgeweitet. Das Aufweiten soll der Verfüllung ca. 10 m vorausseilen. Pro Tag ist ein Fortschritt von 3,0 m veranschlagt. Die Verfüllung erfolgt lagenweise in Schichtdicken von 40 cm. Der Tonring wird parallel zur Verfüllung mit Hilfe eines zylindrischen Ziehbleches mitgeführt und durch Stampfen verdichtet.

Das Schachtmauerwerk wird, der Aufweitung vorausseilend, mit Glasfaserankern gesichert. Die Anker werden im Zuge der Aufweitung mit herausgefräst.

Der Übergang von der Stützsäule zur mineralischen Abdichtung wird konisch ausgeführt und erhält einen zweistufigen Filter gegen Erosion des Abdichtungsmaterials.

9.3.2 Stellungnahme

Gegen die Aufweitung und Verfüllung im Bereich der Unterkreide bestehen in statischer und konstruktiver Hinsicht keine Bedenken.

9.4 Abdichtung des Hilssandsteins im Schacht Konrad 2

9.4.1 Darstellung des Antragstellers

Die wasserführende Hilssandsteinbank ist z. Zt. durch Zementinjektionen und eine Plombe aus Beton und Mauerwerk abgedichtet. Durch die Aufweitung wird ein Teil der Plombe herausgefräst. Um hieraus resultierende Undichtigkeiten zu vermeiden, wird die Hilssandsteinbank vorab zusätzlich über den gesamten Schachtumfang systematisch mit Zementsuspension oder Kunstharz verpreßt. Die Länge der Verpreßbohrungen soll bis zu 12 m betragen. Mit WD-Tests soll der Abdichtungserfolg kontrolliert werden. Kurze Drainagebohrungen bis hinter die Fuge der noch verbleibenden Plombe sollen einen Wasserdruckaufbau in dieser Fuge verhindern.

9.4.2 Stellungnahme

Gegen die vorgesehene Abdichtung des Hilssandsteins bestehen keine Bedenken.

10. Schlußbemerkung

Der in EU 438 vorgelegte Nachweis einer ausreichenden Dichtigkeit der verfüllten Schächte ist nachvollziehbar und schlüssig. Er erfaßt alle für die Dichtigkeit wesentlichen Aspekte. Die Prüfung der einzelnen Nachweisschritte ergab keine wesentliche Beanstandung. Die Ergebnisse des Aufstellers werden durch eigene Untersuchungen bestätigt. Der Unterlage nach liegen die Transmissivitäten der verfüllten Schächte einschließlich der umgebenden Gebirgszone im Bereich der Unterkreide zwischen $2,0 \times 10^{-7}$ bis $2,4 \times 10^{-6}$ m³/s (Transmissivität hier definiert als Produkt aus Durchlässigkeit und Querschnittsfläche von Schacht und umgebender Gebirgszone).

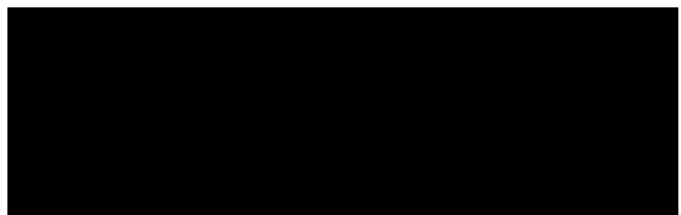
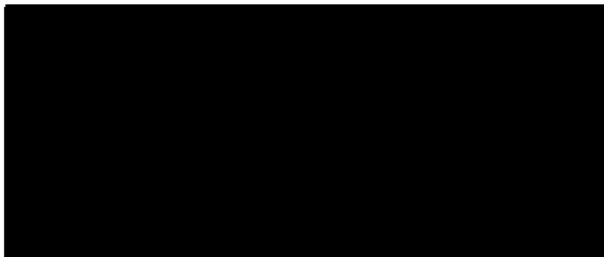
Die vom Antragsteller ermittelten Zahlen für Spannungen, Dehnungen und Durchlässigkeiten sind plausibel und liegen in realistischen Größenordnungen.

Eine wesentliche Kontrolle für die Richtigkeit der errechneten Durchlässigkeiten in der Auflockerungszone im Endzustand ist der Vergleich dieser Werte mit den gemessenen Werten im derzeitigen Zustand. Trotz eines etwas größeren Schachtquerschnittes dürften die Durchlässigkeiten im Endzustand kaum größer sein als z. Zt., da die Aufweitung schonender erfolgt und eine kraftschlüssige Verfüllung in kurzem Abstand folgt. Die Zerfallsneigung der Unterkreide unter Wassereinwirkung und die damit verbundene selbstabdichtende Wirkung sind Reserven für die Dichtigkeit des Systems, vgl. EU 437.

Hinweis:

Vor einer Realisierung der Variante B sind Ausführungsdetails durch Versuche, die die Randbedingungen der Schächte erfassen, zu erproben.

Ich versichere hiermit, das Gutachten unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen frei von Ergebnisweisungen erstellt zu haben.



Radialspannung im Kern in Abhängigkeit von der Zeit :

$$\sigma_z = \left(\gamma - \frac{2c_u}{R} \right) \cdot z \quad (\text{bis zur Konsolidation des Tons})$$

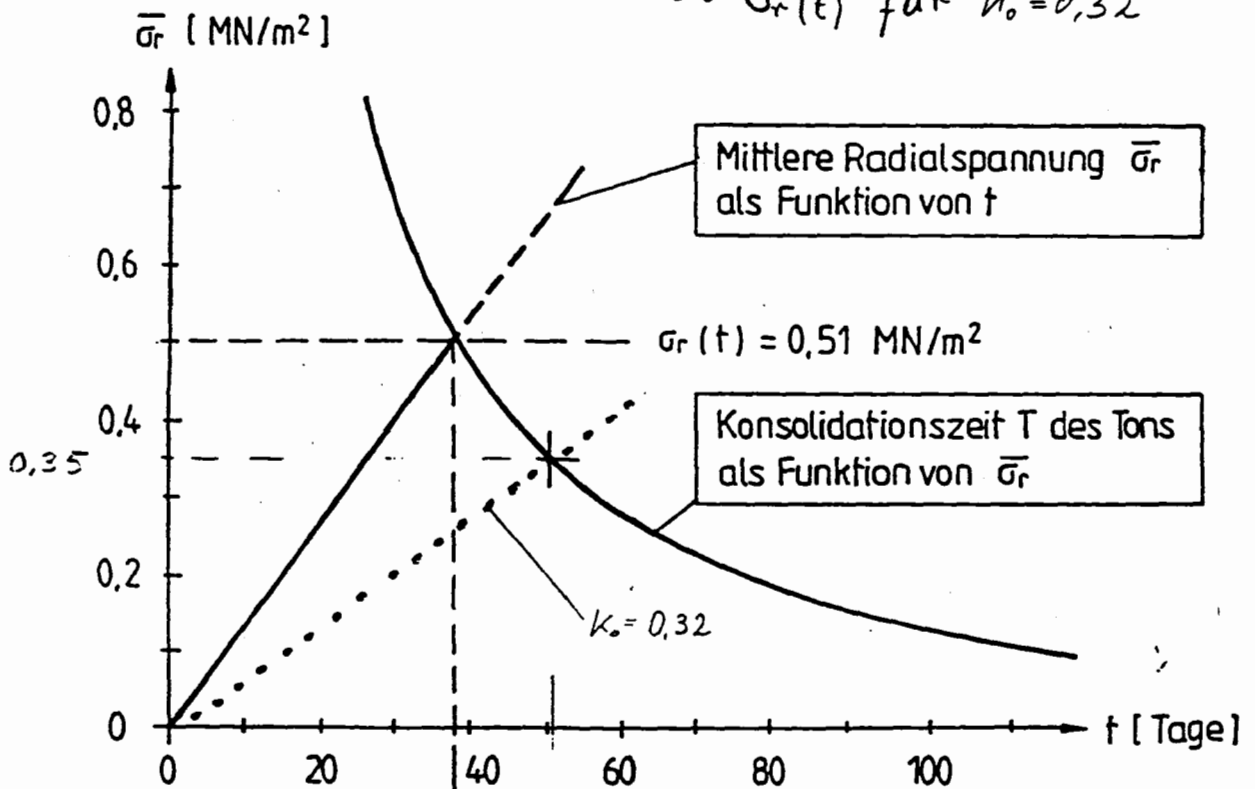
$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_z = 0,009 \cdot z \quad [\text{MN/m}^2]$$

Schüttgeschwindigkeit $\sim 3\text{m/Tag} \Rightarrow \sigma_r = 0,027 \cdot t$

mittlere Radialspannung : $\bar{\sigma}_r = \frac{0,027}{2} \cdot t$

aus Überprüfung:

..... $\sigma_r(t)$ für $k_0 = 0,32$



$T = 38$ Tage

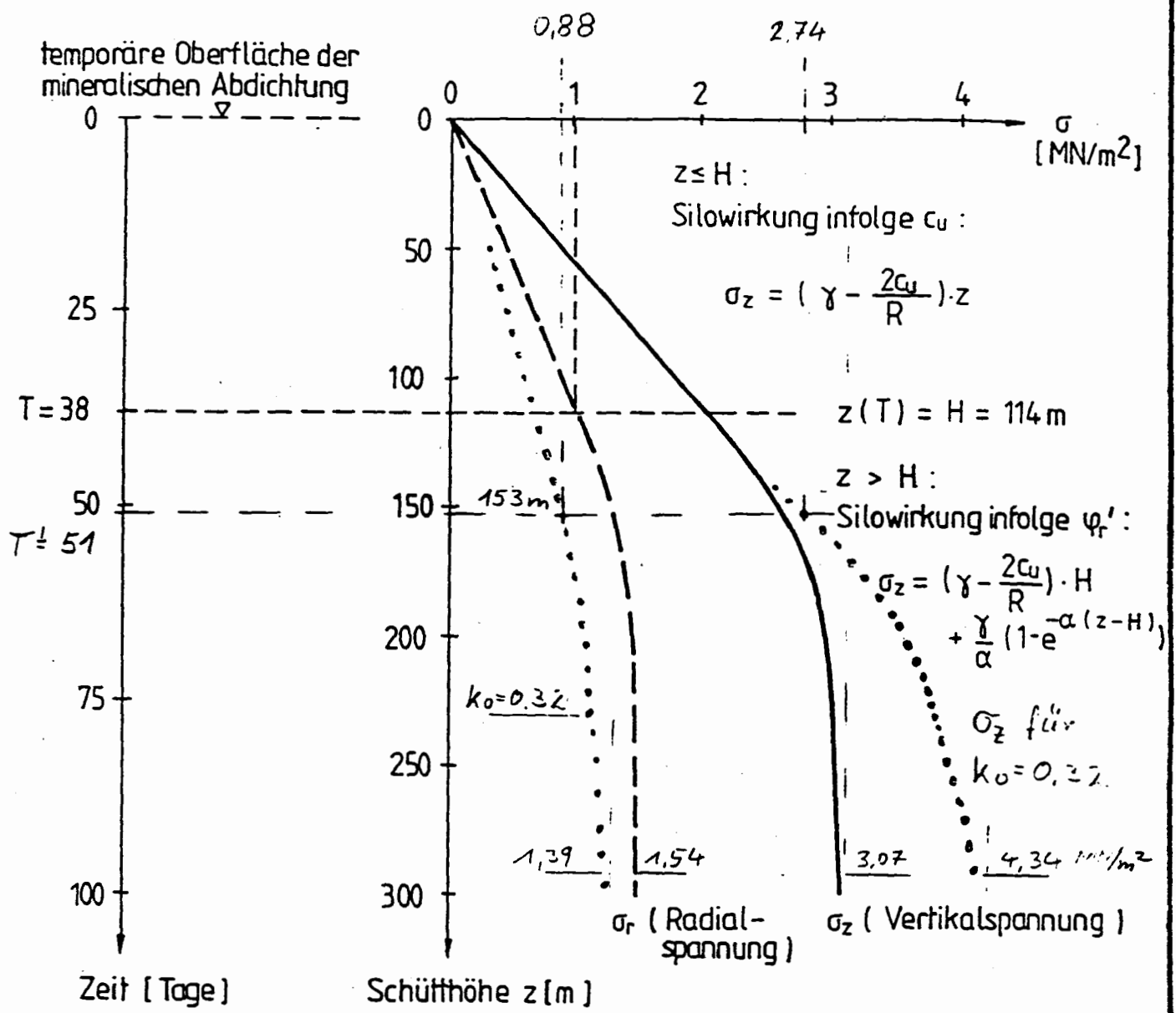
$T' = 51$ Tage

Abb. D-5.12 Eu 438

Mineralische Abdichtung - Variante A

Ermittlung der Konsolidationszeit des Tons

Anlage 2



Annahme: $\frac{\sigma_r}{\sigma_z} = \frac{\nu}{1-\nu} = 0,5$

aus Überprüfung:

..... für $k_0 = 1 - \sin \varphi' = 1 - \sin 43^\circ = \underline{\underline{0,32}}$

Abb. D-5.13 EU 438
Mineralische Abdichtung - Variante A
Spannungen im Kern während der Herstellung
der mineralischen Abdichtung

$$\delta_{rK} = \frac{(1-\nu)^2 (\sigma_r - \sigma_{r0}) \cdot R_i}{(1-\nu - 2\nu^2) [E_{s0} + \nu_e \left(\frac{1-\nu}{1+\nu}\right) (2\sigma_r + \sigma_z)]}$$

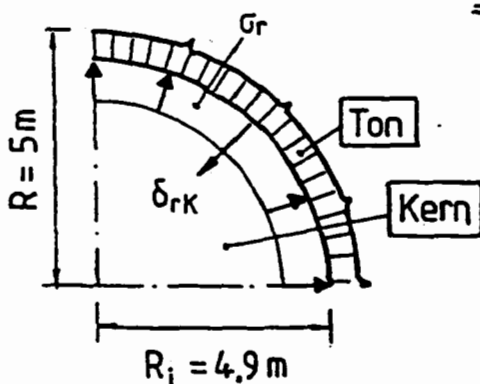
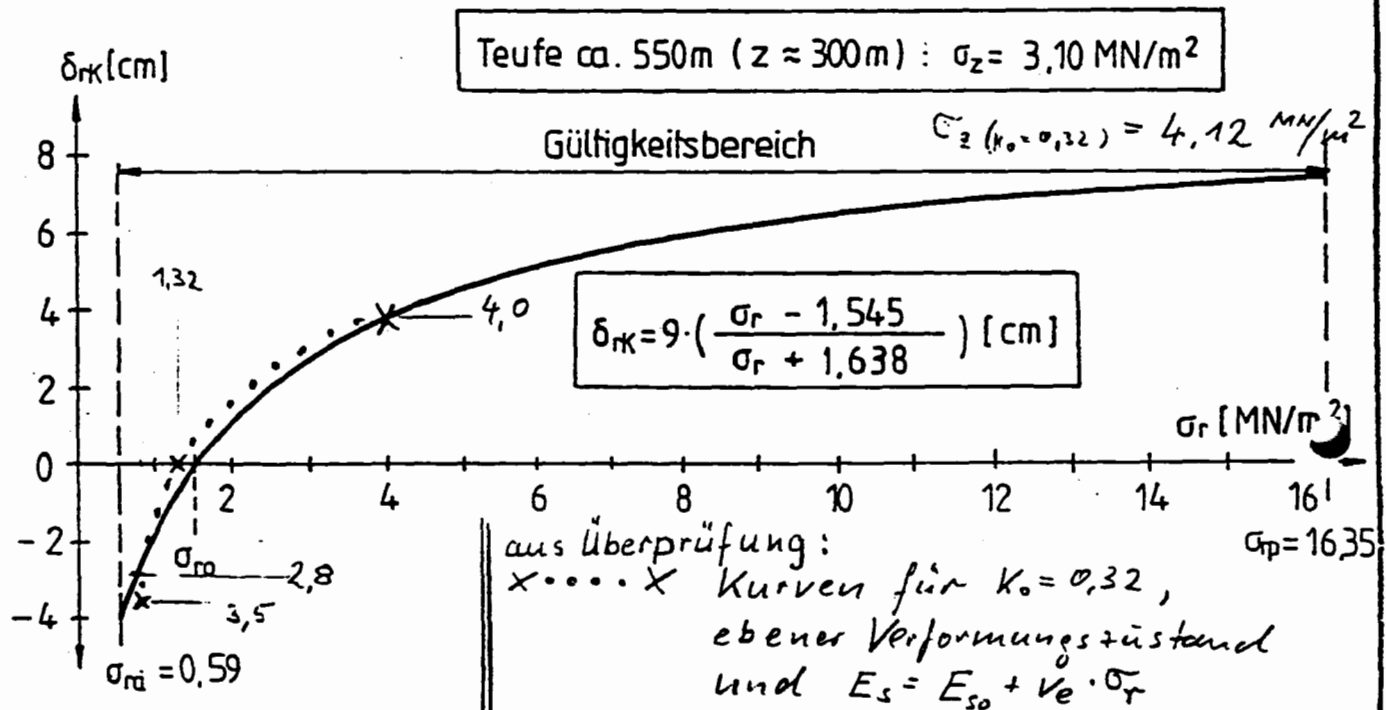
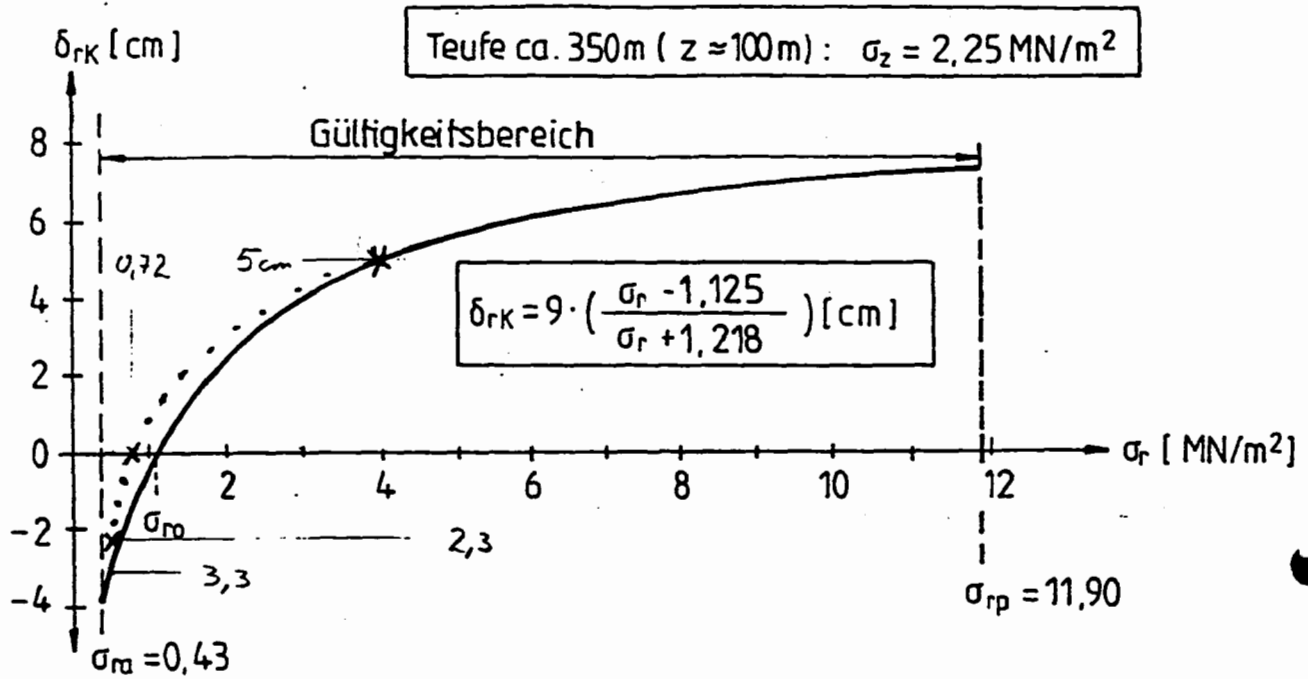


Abb. D-5.15, EU 438

Mineralische Abdichtung - Variante A
 Kennlinien des Kerns für die Teufen
 350 und 550m (Schacht Konrad 2)



Anlage 4

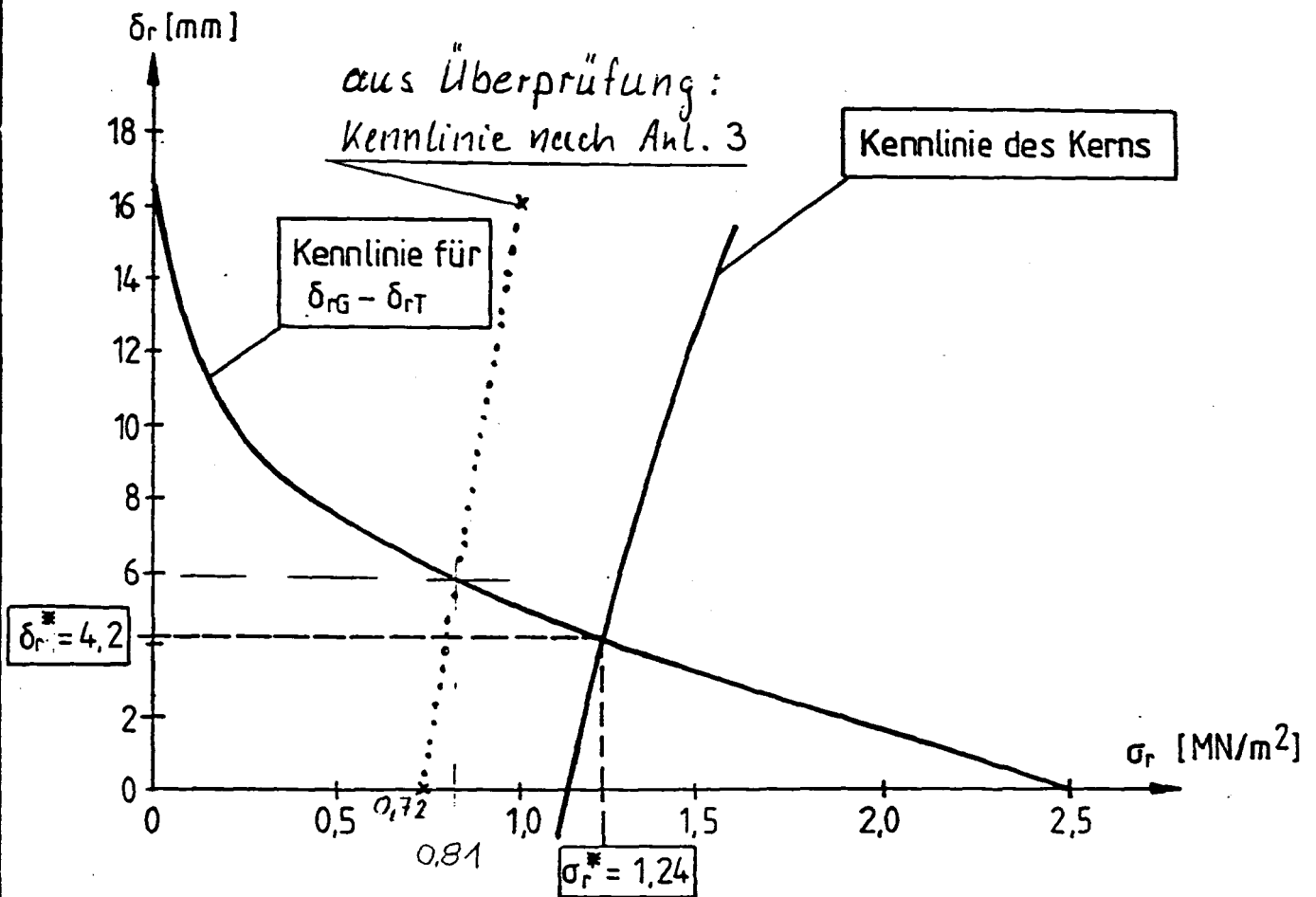
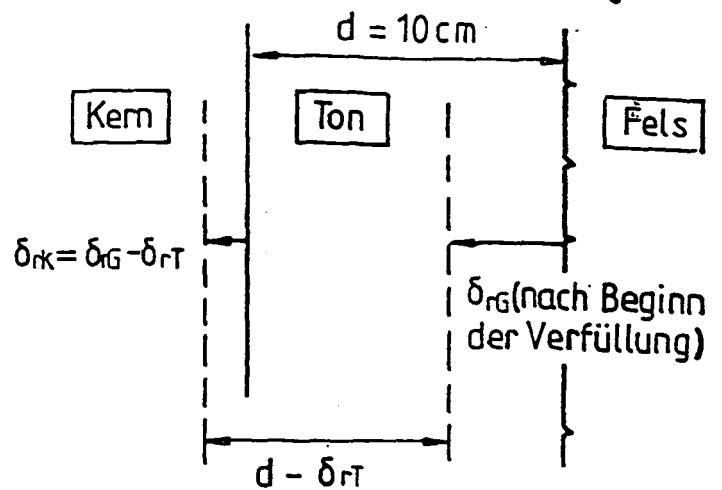
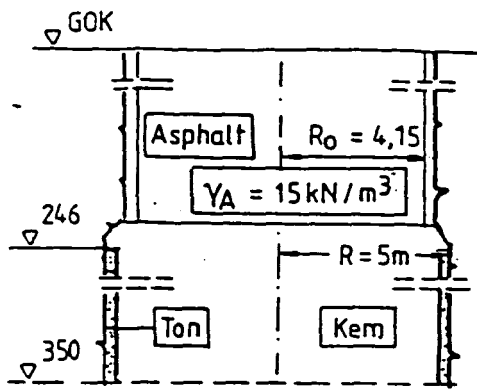


Abb. D-5.16 , EU 438

Mineralische Abdichtung - Variante A

Radialspannung und Radialverschiebungen
im verfüllten Zustand

Teufe 350 m (Schacht Konrad 2)

Anlage 5

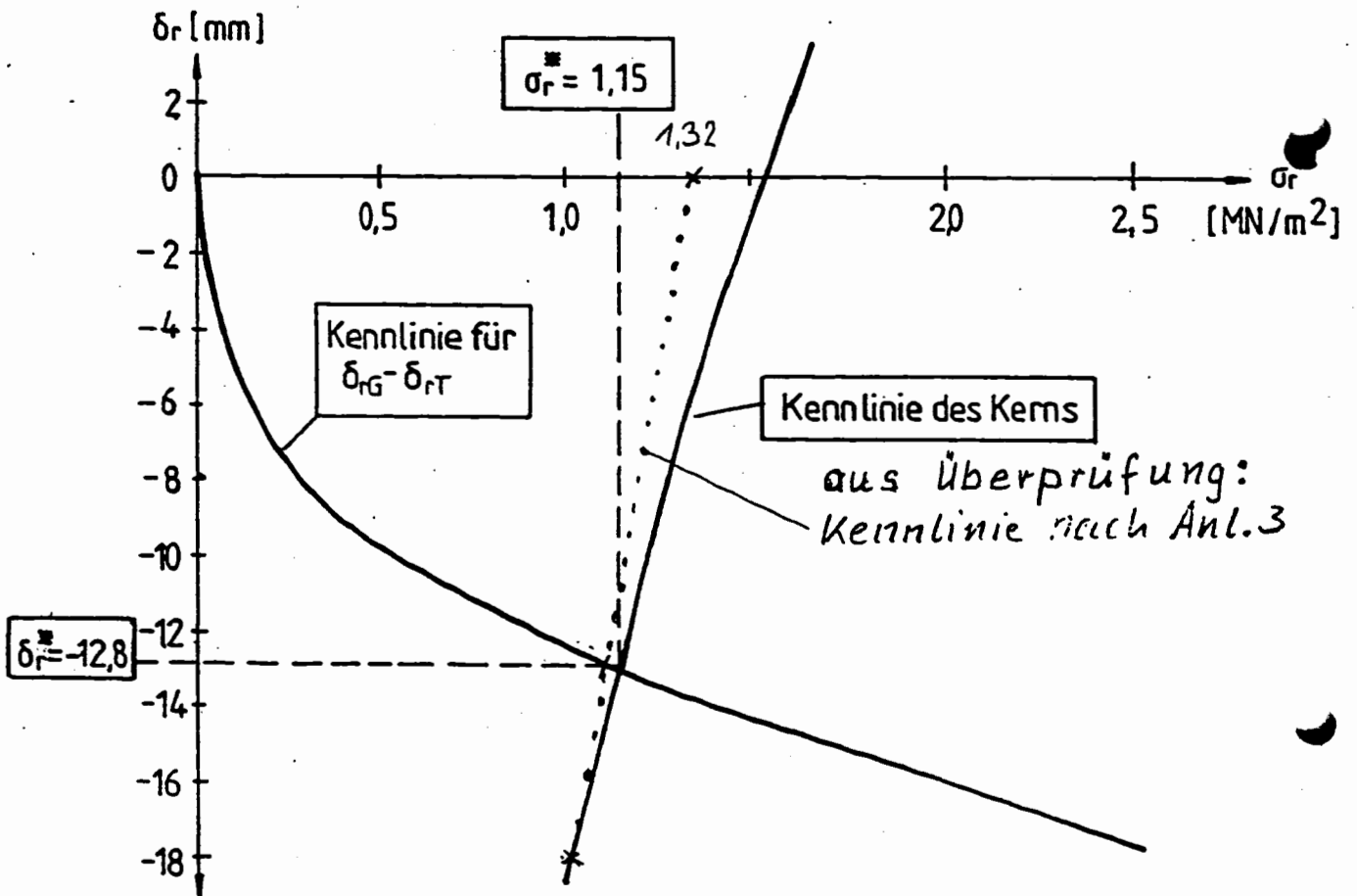
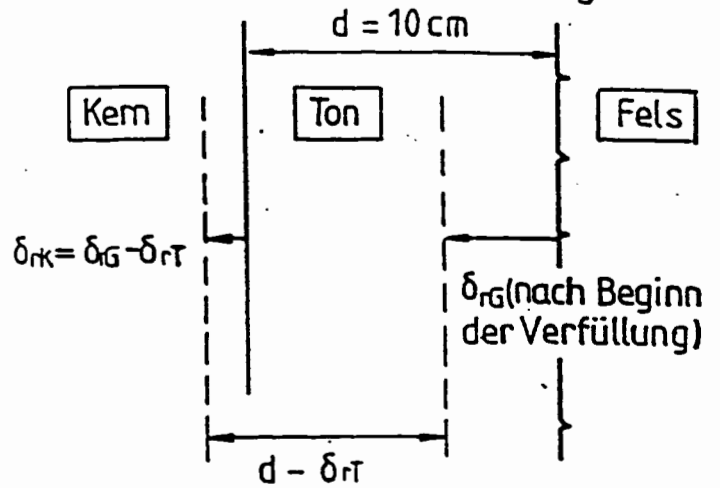
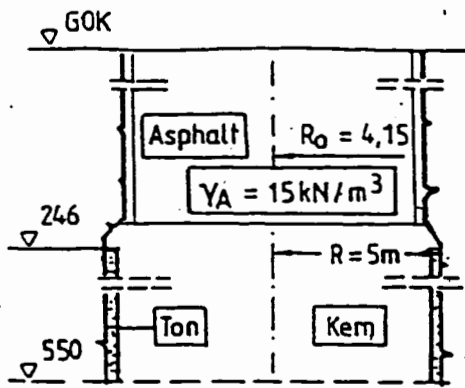


Abb. D-5.17 , E U 438

Mineralische Abdichtung - Variante A
 Radialspannung und Radialverschiebungen
 im verfüllten Zustand
 Tiefe 550m (Schacht Konrad 2)

PROFESSOR DR.-ING. W. WITKE
 Beratende Ingenieure für
 GRUNDBAU UND FELSB AU GmbH
 Königstraße 73b 0-5100 Aachen



ENOLAGER KONRAD
 Schachtverfüllung