



Ingenieurs- Geologische Kring
Netherlands Section of Engineering Geology
Secretaris: Drs. R.Haakmeester
Postbus 264, 6800 AG Arnhem (The Netherlands)
Postgiro 3342108 t.n.v. Penningmeester Ingeokring, Assen

I
N
G
E
O
K
R
I
N
G

N I E U W S B R I E F

NIEUWSBRIEF INGEOKRING

januari 1984

Inhoud

	pag.
Van de redactie	2
Nieuws van de Ingeokring	4
Studiedag afvalberging en ruimtelijke ordening	4
Themadag opslagmogelijkheden in zout	5
Steenzout in Nederland - Dr. H.M. van Montfrans	5
Ingenieursgeologische und geomechanische Grundlagen für den Bau von Speicherkavernen im Salzgebirge - Prof.Dr. M. Langer	6
Die Erdgasspeicherung in Kavernen in der Bundesrepublik Deutschland - Dr. P. Quast	16
Gebirgsmechanische Probleme beim Abschluss einer Speicherkaverne im Salzgestein - Fracdruck - Dr. M. Wallner	17
Het gebruik van in steenzout uitgeloopte holruimten in Nederland - ir. Th.H. Wassmann	36
Nieuw onderzoek naar de geotechnische eigenschappen van gecementeerde zanden - Drs. F. van den Bos	37

Nieuwsbrief van de Ingenieurs-
Geologische Kring
Redactie:
Drs. Peter N.W. Verhoef
Sektie Ingenieursgeologie
Afdeling der Mijnbouwkunde, THD
Mijnbouwstraat 120
Postbus 5028
2600 GA DELFT
Tel.: 015-782543

Van de redactie

Dit nummer van de Nieuwsbrief is voor het grootste deel gewijd aan de themadag: "Opslagmogelijkheden in zout", die op 4 november 1983 bij AKZO-Zout Chemie in Hengelo gehouden is. Het was een boeiende themadag, waar de Duitse gastsprekers een goed overzicht gaven van het gebruik van zoutkoepels voor opslag van aardgas, aardolie en gekomprimeerde lucht. De deformatie-eigenschappen van zoutgesteenten spelen een belangrijke rol bij het ontwerpen van ondergrondse holruimten in zoutformaties. De gesteentemechanika van zoutgesteenten wordt al meer dan 100 jaar bestudeerd. De laatste 30 jaar mede met het oog op de opslag van hoog-radio-actief afval. Dit onderzoek is erg boeiend, omdat bij zoutgesteenten de grens tussen bros-elastisch en taai-plastisch gedrag snel bereikt wordt. Dit geeft speciale geotechnische problemen. Wij zijn daarom blij dat Prof. Langer, voorzitter van de I.A.E.G. en gevestigd onderzoeker van zourheologie, en Dr. Wallner de moeite hebben genomen een uitgebreide samenvatting van hun lezing voor de lezers van de Nieuwsbrief te schrijven.

Het is misschien interessant er op te wijzen dat in Nederland - mede in verband met de hoog-radio-actief afvalproblematiek - door de E.E.G. ondersteund onderzoek naar zoutdeformatie wordt gedaan bij het Energie Onderzoek Centrum Nederland (E.C.N.), de T.H.-Delft (Afdeling der Mijnbouwkunde) en de R.U.-Utrecht (Vakgroep Strukturele en Toegepaste Geologie). In Utrecht zijn de laatste twee jaar nieuwe ontdekkingen gedaan op het gebied van plastische deformatiemechanismen van verschillende zoutgesteenten. De rol van de 0,05 vol.% waterin-sluitseltjes in haliet (steenzout) blijkt bij grotere steundrukken te leiden tot een 3 à 4-maal zo grote verzwakking van haliet dan tot nu toe aangenomen onder dezelfde omstandigheden, een gegeven dat even ter sprake kwam in de discussie.

De Rijksgeologische Dienst (RGD) is bezig de zoutvoorkomens in Nederland te inventariseren. Dr. Van Montfrans toonde met behulp van zeer fraaie illustraties de stand van zaken op dit moment. Dr. Quast gaf een boeiend verslag van de meer dan honderd opslagruimten voor aardgas die sinds een vijftien jaar door middel van oplosmijnbouw in zoutlagen en zoutkoepels in West-Duitsland gekonstrueerd zijn.

De gastheer van deze geslaagde themadag, ir. Wassmann van AKZO, gaf een helder overzicht van de (beperkte) mogelijkheden voor opslag in Nederland en roerde ook nog het - inmiddels opgeloste - interessante oppervlakteverzakkingsprobleem aan waarmee de AKZO te kampen heeft op zijn fabrieksterreinen.

In verband hiermee kunnen wij nog wijzen op de studiedag over afvalberging op 29 februari die in dit blad aangekondigd wordt.

Tenslotte: Het adresseringssysteem van de kring is geautomatiseerd. Wilt u ons over onjuiste adressering of andere onrechtmatigheden informeren.

Peter N.W. Verhoef

Nieuws van de Ingeokring

De komende maanden kunt u de volgende evenementen verwachten:

- In februari een lezing van Dr. Prinia over oppervlakte-verzakking in Bangkok (plaats: Delft).
- In mei een themadag over gesteentemechanika.

Studiedag Afvalberging en ruimtelijke ordening

De Overleggroep "Afvalberging van de Raad voor Milieu- en Natuuronderzoek (RMNO) organiseert op 29 februari 1984 een studiedag over het onderwerp "Afvalberging en Ruimtelijke Ordening": onderzoek naar onderlinge relaties en technische mogelijkheden. Doel van de dag is een beter inzicht te krijgen in de behoefte aan onderzoek op het gebied van bescherming van milieu en natuur en naar de daarbij gepaard gaande belangenafwegingen.

Bijgaand treft u het programma van de studiedag aan. De dag zal worden geopend door Prof. Dr. D.J. Kuenen, voorzitter van de RMNO en zal worden voorgezeten door Ir. B.P. Hageman (Rijks Geologische Dienst) en Ir. G.J.J. van der Laan (VNO/NCW).

De bijeenkomst wordt gehouden in de grote vergaderzaal van het hoofdkantoor TNO te Den Haag. Door de beperkte ruimte kunnen maximaal 140 personen aan deze dag deelnemen. De kosten bedragen f 10,= per persoon waarvoor lunch, koffie en thee zal worden geserveerd.

Voor nadere inlichtingen en schriftelijke opgave tot 15 februari 1984 kan men zich wenden tot:

Dr. P.B. Smoor
SCMO-TNO
Postbus 186
2600 AD DELFT
tel. 015 - 569330 tst 2447

DAGINDELING

9.30 uur	Ontvangst met koffie Dagvoorzitters: Ir. B.P. Hageman, Rijks Geologische Dienst (ochtend) Ir. G.J.J. van der Laan, VNO-NCW (middag)
10.00	Opening door Prof. Dr. D.J. Kuenen, Voorzitter RMNO
10.10	Inleiding Ir. G.J.J. van der Laan
10.30	De juridische relaties afvalberging en ruimtelijke ordening. Mr. Dr. F.P.J.M. Otten, Prov. Griffie, Overijssel
11.15	Koffiepauze
11.30	Planologische regelingen en ruimtelijke inrichting van afvalopslaglocaties. Prof. Ir. A. Dekker, Prov. Planologische Dienst, Overijssel
12.15	Discussie (Ir. B.P. Hageman)
12.45	Lunchpauze

- 13.45 Programma van eisen, richtlijnen en knelpunten bij het ontwerpen en inrichten van afvalopslagplaatsen.
Dr. Ir. G.E. Kamerling, Min. VROM
- 14.30 Milieutechnische oplossingen en voorzieningen ter voorkoming en beperking van bodem- en grondwaterverontreiniging bij afvalberging.
Ir. A.T. van der Geest, DHV, Amersfoort
- 15.00 Theepauze
- 15.30 Discussie (Ir. G.J.J. van der Laan)
- 16.30 Sluiting

THEMADAG OPSLAGMOGELIJKHEDEN IN ZOUT

Samenvattingen van de op 4 november 1983 gehouden lezingen.

Steenzout in Nederland. - Dr. H.M. van Montfrans

Steenzout, NaCl en soms K-Mg zouten, werd binnen het huidige Nederlandse territorium in de volgende periodes gevormd:

- Laat-Jura - Niedersachsen Group
- Trias - Keuper Formation
- Trias - Muschelkalk Formation
- Trias - Röt Formation
- Laat-Perm - Zechstein Group
- Vroeg-Perm - Upper Rotliegend Group

De voorkomens van Vroeg-Perm t/m Trias kwamen tijdens een ongeveer gelijkblijvende bekken configuratie tot stand. In de Laat-Jura was deze echter totaal veranderd.

Naar de randen van de bekkens en naar ondiepere gedeelten binnen deze bekkens toe treden er faciële verschillen op. Tevens is er in verticale (= tijd) zin sprake van faciële verschillen als gevolg van de indampingscycli. Dit laatste is met name uit het Laat-Perm bekend.

Na afzetting zijn deze zouten in bepaalde gebieden verloren gegaan door erosie. Elders trad onder daarvoor gunstige omstandigheden beweging van het steenzout, of halokinese, op. Dit leidde tot de vorming van "structuren": zoutkussens, -ruggen en -koepels. Deze zijn om een aantal redenen, waaronder het vaak enorme volume en het goed mijnbaar zijn van zout, interessant uit ingenieurs-geologisch oogpunt. De Rijks Geologische Dienst karteert thans deze zoutstructuren.

INGENIEURGEOLOGISCHE UND GEOMECHANISCHE GRUNDLAGEN
FÜR DEN BAU VON SPEICHERKAVERNEN IM SALZGEBIRGE

Vortrag zum Seminar der
niederländischen Nationalgruppe IAEG
am 4. November 1983 in Hengelo

von Prof. Dr. M. LANGER *)

Kurzfassung

1. Nutzung von Salzlagerstätten

Der Bedarf an Speicherkavernen (Öl, Gas, Druckluft) und Deponien (radioaktiver Abfall, Giftmüll) steigt in zunehmendem Maße. Steinsalz eignet sich in hervorragender Weise zur Anlage solcher Hohlräume. In allererster Linie ist hier darauf hinzuweisen, daß das Salzgebirge praktisch undurchlässig für Gase und Flüssigkeiten ist. Dies lehrt uns die Erdölgeologie. Eine ganze Reihe von Kohlewasserstofflagerstätten gäbe es nämlich nicht, wenn sie nicht von Salzlagerstätten abgedeckt worden wären. Der Grund für diese Dichtigkeit ist die plastische Verformbarkeit von Salzgesteinen in einem weiten Druck-, Temperatur- und Verformungsgeschwindigkeitsbereich; denn diese Fähigkeit verhindert das Aufreißen bzw. Offenbleiben von Spalten und Klüften, auf denen Flüssigkeiten und Gase zirkulieren könnten. Diese abdichtende Wirkung erfüllt Steinsalz natürlich auch gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, die in künstlich geschaffene Hohlräume gebracht werden, wie z.B. Erdöl, Erdölprodukte, Stadtgas oder Druckluft.

*) Prof. Dr. M. Langer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, BRD.

Die Speicherung in Salzkavernen ist nicht nur eine umweltfreundliche sondern auch kostengünstige Methode zur Lagerung von Energiestoffen, da nicht nur mit der Ausspülmethode ein Verfahren zur Verfügung steht, große Lagerkapazitäten zu erstellen, sondern auch auf Grund günstiger mechanischer Eigenschaften das Salzgebirge ohne Ausbau standfest gehalten werden kann.

Das herausragende Merkmal ist die Fähigkeit des Steinsalzes, auftretende Spannungsspitzen (z.B. bei Herstellung der Kaverne) durch plastische Verformung abzubauen. Die Gefahr des eigentlichen Bruches (Aufreißen von Klüften, Abschalungen etc.) ist gering, weil das Material bereits vorher - bei Erreichen der Fließgrenze - den Spannungen durch Verformung ausweicht. Da in die Kaverne (im Gegensatz zum üblichen Felshohlbau) keine der bekannten Ausbaue (z.B. Verankerung, Spritzbeton) zur Erhöhung der Standsicherheit eingebracht werden kann, die Kavernenwandung aber absolut dicht sein muß, ist es gerade diese Eigenschaft der Plastizität, die das Salzgebirge für die Speicherung von Energiestoffen so geeignet erscheinen läßt.

Salzton und insbesondere der Hauptanhydrit stellen ein gebräches Gebirge dar und dürfen deshalb an der Firste oder an den Wänden einer Kaverne nicht angesolt werden. Sie enthalten darüber hinaus vielfach Klüfte und Spalten, die zwar meist durch Auskristallisation sekundärer, leicht löslicher Salzminerale verheilt sind, nach deren Herauslösung es aber zu Nachbrüchen in die Kaverne oder zu unerwünschten hydraulischen Kontakten kommen kann, so daß die Abdichtung des Speicherraumes nicht gegeben ist.

Die für eine Berechnung der Standsicherheit und Konvergenz von Kavernen im Steinsalzgebirge notwendigen Bedingungen und Voraussetzungen werden im folgenden kurz abgehandelt.

2. Konzept einer Standsicherheitsanalyse

Für die sichere Anlage von Strecken, Kammern, Kavernen in Salzlagerstätten liegen jahrzehntelange Erfahrungen vor. Dennoch stellt sich immer wieder die Frage nach einer einerseits sicheren andererseits wirtschaftlichen Dimensionierung von Grubenbauen und Kavernen.

Der Sicherheitsbegriff des Hoch- und Ingenieurbaus, der Sicherheitskoeffizienten auf Lasten und Werkstoffe bezieht, ist ähnlich wie im Felshohlraumbau auf den Salzkavernenbau und Salzbergbau nicht übertragbar, selbst in der Form von partiellen Sicherheitsfaktoren nicht. Die Standsicherheitsaussage muß daher eine andere Form als bei üblichen Ingenieurbauten haben. Bei der Beurteilung aller Einflüsse (z. B. Primärspannungszustand des Gebirges, Gebirgseigenschaften, Bauvorgängen, Güte der meßtechnischen Überwachung) muß die Summe der Sicherheiten in den Einzelansätzen die Summe der unsicheren Anteile so sehr überwiegen, daß ein Versagen oder Schadensfall für die Bauzustände im Laufe der Lebenszeit wahrscheinlich ist. Für den Fall des Salzbergbaus und Salzkavernenbaus bedeutet dies, daß ein Hohlraum im Salzgebirge als standsicher angesehen werden kann, wenn folgende Einzelnachweise erbracht werden:

- während und nach der Erstellung der Hohlräume treten keine unzulässigen Verformung weder im Hohlraum selbst noch an der Tagesoberfläche auf, die die Funktionsfähigkeit der Grubenbaue noch die Sicherheit von Bauwerken übertage beeinträchtigen
- das Tragvermögen des Gebirges wird weder örtlich (lokales Versagen) noch als Ganzes (Zusammenbruch) so erniedrigt, daß sich schlagartige oder allmähliche Verbrüche von Hohlräumen ereignen.

Diese Kriterien eines Standsicherheitsnachweises sind durch verschiedene natürliche wie technische Faktoren beeinflusst (vgl. Tab. 1). Deshalb kann ein solcher Nachweis im konkreten Fall nur durch Kombination von ingenieurgeologischen Erkundungen, geotechnischen Untersuchungen, felsmechanischen Messungen, felsstatischen Berechnungen, meßtechnischen Überwachungen und bergbaulicher Betriebserfahrung erfolgen. Umfang und Genauigkeit der Erkundungen und Messungen sowie die Sicherheitszuschläge bei den felsstatischen Berechnungen für die jeweiligen Einzelnachweise richten sich nach der Schwere der möglichen Schadensfolgen. Erkundungen, Messungen und theoretische Berechnungen dürfen dabei nicht isoliert betrachtet werden, sie gehören funktional zusammen und stützen sich gegenseitig (z.B. mechanisches Modell des Gebirges und Parameteranalysen und Kontrolle statischer Berechnungen). Die fortlaufende, den einzelnen Planungs-

Bau- und Betriebsphasen angepaßte Vervollständigung und Überprüfung des Kenntnisstandes zur Standsicherheit ist wesentlicher Bestandteil dieses beschriebenen geotechnischen Standsicherheitskonzeptes.

SICHERHEITS-KRITERIEN	NATÜRLICHE EINFLÜSSE	TECHNISCHE EINFLÜSSE	MASSNAHMEN
Verformungen	Geologische Verhältnisse	Hohlraum-geometrie	Geologische Erkundung
Spannungen	Tektonik	Bauverfahren	Geotechnische Untersuchung
Versagensform	Primärspannung	Nutzungsart	Statische Berechnung
Tragvermögen	Mechanische Gebirgskennwerte	Betriebsbedingungen	Kontrollmessung
Laugeneinbruch	Gas- und Laugenvorkommen	Temperatur	Bergbauliche Maßnahmen

GEOTECHNISCHES STANDSICHERHEITSKONZEPT

Tab. 1: Geotechnisches Standsicherheitskonzept

Erstes Ziel von Standsicherheitsberechnungen ist also der Nachweis, daß die durch den Hohlraumbruch hervorgerufenen Spannungsumlagerungen einen Gleichgewichtszustand annehmen und sich keine unzulässigen Konvergenzen und Schäden während der Nutzungszeit einstellen, d.h. es müssen Spannungs-

und Verformungsverteilungen bzw. Verformungsgeschwindigkeitsverteilungen im die Grubenbaue (Kavernen, Strecken, Schächte) umgebenden Gebirge unter Berücksichtigung der zeit- und temperaturabhängigen rheologischen Eigenschaften der Gesteine berechnet werden. Ein für die Lösung solcher geomechanischer Problemstellungen besonders geeignetes Rechenverfahren stellt die Finite-Element-Methode dar. Dieses computer-gerechte numerische Rechenverfahren ermöglicht es, die für die Standsicherheit wichtigen Einflußfaktoren (Tab. 1) wie Geologie, Betriebsbedingungen, Hohlraumgeometrie und Bauverfahren in wirklichkeitsnahen Ansätzen zu berücksichtigen. Das FEM-Verfahren ist sowohl für die Berechnung linearer wie nichtlinearer Randwertaufgaben geeignet; insbesondere kann es auf das bei Salzgesteinen so hervorstechende zeit- und temperaturabhängige Stoffverhalten ohne Schwierigkeiten ausgerichtet werden.

3. Stoffmodelle für Salzgestein

Eine Dimensionierung von Pfeilern und Kavernen auf der Grundlage des beschriebenen Konzeptes einer Standsicherheitsanalyse ist nur möglich, wenn das mechanische Verhalten von Salzgesteinen mit genügender Genauigkeit erfaßt ist.

In der Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe wurden in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens von Salzgesteinen durchgeführt, um zu einem pragmatischen Stoffmodell zu kommen.

Die umfangreichen theoretischen wie experimentellen Untersuchungen an deutschen Steinsalzproben zeigen, daß

- das rheologische Verhalten von Steinsalzkörpern im Prinzip mit dem Modell eines erweiterten SCHOFIELD-SCOTTBLAIR-Körpers mit Kriech- und Fließgrenze beschrieben werden kann
- die Temperaturabhängigkeit des Kriechens der ARRHENIUS-Gleichung folgt
- verschiedene empirische Stoffgesetze auf verschiedene Verformungsmechanismen im Kristallgefüge zurückgeführt werden können ("deformation maps")
- die Fließgrenze (z.B. nach Definition DRUCKER-PRAGER) temperatur- und spannungsabhängig (bzw. abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit) ist
- der Übergang vom "Fließen" zum "Bruch" nur mit Hilfe der Parameter Spannungszustand, Verformungsgeschwindigkeit, Temperatur definiert werden kann.

Es ist daher notwendig, bei der Entwicklung eines Kriteriums für die Grenztragfähigkeit neben der Spannungsabhängigkeit auch die Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur einzubeziehen.

Tabelle 2 gibt die daraus folgende Stoffgesetzformulierung wider. In Tabelle 3 sind die dazugehörigen Stoffparameter für Steinsalz (Liniensalz Na_3B) zusammengefaßt dargestellt.

4. Schlußbemerkung

In den letzten Jahren hat die Forschung auf dem Gebiet der Rheologie der Salzgesteine - nicht zuletzt durch neuartige Problemstellungen im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle - einen außergewöhnlichen Aufschwung erfahren. Sowohl auf versuchstechnischem Gebiet wie auch in der theoretischen Erfassung des mechanischen Verhaltens von Salzgesteinen konnten bemerkenswerte Erfolge erreicht werden. Parallel dazu erfolgte eine laufende Verbesserung der numerischen Rechenverfahren, so daß gute Grundlagen für die praktische Lösung bautechnischer Probleme im Salzgebirge gegeben sind. Allerdings fehlen zur Zeit einheitliche, allgemein anerkannte Konzepte, Empfehlungen oder gar Richtlinien, wie eine Standsicherheitsanalyse für Hohlräume im Salz unter Berücksichtigung der jeweiligen Nutzungsart durchzuführen sei.

$\dot{\underline{\epsilon}}_{ges} = \dot{\underline{\epsilon}}^{el} + \dot{\underline{\epsilon}}^{cr} \quad \quad \dot{\underline{\epsilon}}^f \quad (1)$
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{el} = -\frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} + \alpha_t \Delta \vartheta \delta_{ij} \quad (2)$
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{\epsilon_{eff}^{cr}}{\sigma_{eff}^{cr}} \underline{s}_{ij} \quad (3)$
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{cr} \dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{cr}} \quad (4)$
$\sigma_{eff} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{s}_{ij} \underline{s}_{ij}} \quad (5)$
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = \sum_{i=1}^3 \dot{\epsilon}_{eff}^{cr i} (S, \sigma_{eff}, \vartheta) \quad (6)$
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 1} = A_1 e^{\frac{-Q_1}{R\vartheta}} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_1} \quad (7)$
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 2} = A_2 e^{\frac{-Q_2}{R\vartheta}} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_2} \quad (8)$
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 3} = 2 \left(B_1 e^{\frac{-Q_1}{R\vartheta}} + B_2 e^{\frac{-Q_2}{R\vartheta}} \right) \sinh \left(D \left\langle \frac{\sigma_{eff} - \sigma_{eff}^0}{\sigma^*} \right\rangle \right) \quad (9)$
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^f = \dot{\lambda} \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} \quad (10)$
$f = \tau_0 - C_1 \sigma_0^\alpha \quad (11)$

Tabelle 2: Stoffgesetzformulierung

Elastizitätskonstanten:

$$E = 25.000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,27$$

Bruchkennwerte:

$$C_1 = 2,468$$

$$\alpha = 0,718$$

Kennwerte für stationäres Kriechen:

A_1	=	$1,27 \times 10^7$	(d^{-1})
Q_1	=	113	(kJ/mol)
n_1	=	5,5	(-)
A_2	=	0,18	(d^{-1})
Q_2	=	54	(kJ/mol)
n_2	=	5	(-)
B_1	=	$1,86 \times 10^{12}$	(d^{-1})
B_2	=	$5,76 \times 10^4$	(d^{-1})
D	=	0,24	(-)
$\sigma_{\text{eff}}^{\circ}$	=	20	(MPa)
σ^*	=	1	(MPa)
R	=	$8,3143 \times 10^{-3}$	(kJ/ (K mol))

Tabelle 3: Stoffparameter für Steinsalz (Liniensalz Na3B)

Peter Quast^{*)}
Hannover, d. 06.10.1983

ABSTRACT

Die Erdgasspeicherung in Kavernen in der
Bundesrepublik Deutschland

Die großtechnische Herstellung von stabilen
Kavernen im Steinsalz zur Speicherung von
flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen
durch "solution mining" begann in der Bundes-
republik Ende der sechziger Jahre. Seitdem sind
mehr als 100 Speicherkavernen sowohl in Salz-
diapiren als auch im Schichtensalz erstellt worden.
Alle Kavernen sind ohne größere technische
Probleme im Betrieb.

Der Vortrag gibt einen Überblick über die Beson-
derheiten bei der Auslegung, Herstellung und
Komplettierung von Kavernen zur Erdgasspeicherung.
Weiterhin werden anhand von ausgewählten Beispielen
Ergebnisse zum Langzeitverhalten der Kavernen
gegeben.



*) Dr.ir. P. Quast, Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH,
Hannover, BRD.

GEBIRGSMECHANISCHE PROBLEME BEIM ABSCHLUSS
EINER SPEICHERKAVERNE IM SALZGESTEIN
- FRACDRUCK -

Dr.-Ing. M. Wallner

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Hannover, Bundesrepublik Deutschland

1. Einleitung

Für den sicheren und wirtschaftlichen Entwurf von Speicherkavernen im Salzgestein sind aus gebirgsmechanischer Sicht Fragen bezüglich der maximalen bzw. optimalen Kavernenabmessungen, des zulässigen gegenseitigen Abstandes, der Mindestüberdeckung durch Salzgestein, der zulässigen Druckschwankungen bzw. des zulässigen Druckanstiegs sowie der Kavernenkonvergenz zu beantworten.

Die Anlage selbst großer Kavernen im Salzgebirge resultiert aus den günstigen mechanischen Eigenschaften des Salzgesteins. Aufgrund des zeit-, temperatur- und spannungsabhängigen, nichtlinearen Verformungsverhaltens treten allerdings langfristige Verformungen auf. Zur Beherrschung dieser Problematik haben die in jüngster Zeit auf dem Gebiet der Salzmechanik weltweit erreichten Forschungsergebnisse wesentlich beigetragen: Es wurden konsistente, physikalisch begründete Materialgesetze für Salzgestein abgeleitet und geeignete numerische Rechenverfahren nach der Finite Element Methode entwickelt.

Auf der Grundlage numerischer Berechnungen zum Spannungs- und Verformungszustand, die die rheologischen Eigenschaften des Salzgebirges wirklichkeitsnah erfassen und damit realistische Prognosemodelle zulassen, erhielt der planende Ingenieur alle notwendigen zeitlichen Aussagen zum großräumigen Tragverhalten von Kavernen im Salzgebirge.

2. Problemstellung

Die Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit einer Speicherkaverne in bestimmter Teufe und bei gegebenen geometrischen Abmessungen hängt entscheidend von der geologischen Situation, den rheologischen Materialeigenschaften des Salzgesteins, der Gebirgstemperatur und den Gebirgsspannungen sowie den Druckverhältnissen in der Kaverne ab. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage nach:

- dem maximal zulässigen Druck und
- der maximal zulässigen Druckänderungsgeschwindigkeit

in der Kaverne.

Richtwerte für einen zulässigen Druckgradienten für Speicherkavernen im Salzgestein sind auf der Grundlage von in situ Fracversuchen festgelegt (Gloria, Costinescu, 1978). Wegen der zeitabhängigen rheologischen Materialeigenschaften der Salzgesteine und der damit verbundenen langfristigen Spannungsumlagerungen um eine Kaverne oder Bohrung muß allerdings die Frage aufgeworfen werden, ob die so ermittelten Fracdruckwerte ohne weiteres auf andere als im Versuch selbst vorhandene Verhältnisse übertragen werden können.

Weiterhin ist es zweckmäßig, drei verschiedene Fälle zu betrachten:

- Hydraulic-fracturing; sehr schnelle Druckaufbringung bis zur Rißbildung, z.B. zum Zwecke der Spannungsermittlung
- planmäßige Druckschwankungen mit bestimmter Druckänderungsgeschwindigkeit;
- Abschluß einer flüssigkeits- oder gasgefüllten Kaverne mit selbsttätigem Druckaufbau infolge Kavernenkonvergenz.

Anhand einiger grundlegender Forschungsergebnisse zum Fracdruck soll nachfolgend gezeigt werden, daß diese 3 Fälle ganz unterschiedlich zu bewerten sind.

3. Materialverhalten von Salzgestein

In der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Salzgestein durchgeführt. Ziel der Laboruntersuchungen war es, ein umfangreiches Bild über das spannungs- und temperaturabhängige rheologische Verhalten der Salzgesteine zu erhalten und physikalisch begründete Stoffgleichungen abzuleiten.

Über einzelne Ergebnisse der Untersuchungen ist mehrfach berichtet worden (Langer 1979, Wallner et al 1979, Wallner 1981a, Staupendahl et al 1982, Wallner 1983).

Wie wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Auf Spannungsänderungen reagiert Salzgestein spontan elastisch.
- Bei konstanten, aber nicht isostatischen Spannungen (Spannungsdeviator) und konstanter Temperatur zeigt Salzgestein zeitabhängige Verformungen (Kriechen), die sich allmählich einem stationären Wert nähern. Diese stationäre Kriechgeschwindigkeit ist maßgebend für langfristige Verformungen und überproportional vom Spannungsdeviator und der Temperatur abhängig. Eine signifikante Kriechgrenze scheint nicht vorhanden zu sein.
- Das Festigkeitsverhalten ist durch eine sehr geringe Zugfestigkeit und eine relativ hohe Druckfestigkeit gekennzeichnet. Die Bruchfestigkeit hängt entscheidend von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ab. Unterhalb einer durch die Zustandsgrößen Spannung, Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur vorgegebenen Grenzbeanspruchung ist Salzgestein bei Druckbelastung unbegrenzt tragfähig (Langzeitfestigkeit).

Aus umfangreichen Laborversuchen an Steinsalz wurde das in Abb. 1 angegebene Stoffmodell entwickelt, daß sich zusammensetzt aus:

- elastischem Verzerrungsinkrement $\dot{\epsilon}^{el}$
- Kriechinkrement $\dot{\epsilon}^{cr}$ für 3 unterschiedliche Kriechmechanismen (stationäres Kriechen)
- Bruchverformungsinkrement $\dot{\epsilon}^f$ (Langzeitfestigkeit)

$\dot{\underline{\epsilon}}_{ges} = \dot{\underline{\epsilon}}^{el} + \dot{\underline{\epsilon}}^{cr} \dot{\underline{\epsilon}}^f$	(1)
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{el} = -\frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} + \alpha_t \Delta \vartheta \delta_{ij}$	(2)
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{\epsilon_{eff}^{cr}}{\sigma_{eff}^{cr}} s_{ij}$	(3)
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_{ij} s_{ij}$	(4)
$\sigma_{eff} = \sqrt{\frac{3}{2}} s_{ij} s_{ij}$	(5)
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = \sum_{i=1}^3 \dot{\epsilon}_{eff}^{cr i} (S_i \sigma_{eff} \vartheta)$	(6)
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 1} = A_1 \cdot \frac{-Q_1}{R \vartheta} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_1}$	(7)
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 2} = A_2 \cdot \frac{-Q_2}{R \vartheta} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_2}$	(8)
$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr 3} = 2(B_1 \cdot \frac{-Q_1}{R \vartheta} + B_2 \cdot \frac{-Q_2}{R \vartheta}) \sinh(D < \frac{\sigma_{eff} - \sigma_{eff}^0}{\sigma^*} >)$	(9)
$\dot{\underline{\epsilon}}_{ij}^f = \dot{\lambda} \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}}$	(10)
$f = \tau_0 - C_1 \sigma_0^a$	(11)

Abb. 1: Materialmodell für Steinsalz

4. Rechenprogramm ANSALT

Das Rechenprogramm ANSALT wurde von der BGR in Zusammenarbeit mit Control Data GmbH, Hamburg, zur Berechnung thermomechanischer Beanspruchungen von untertägigen Hohlraumstrukturen im Salzgestein entwickelt (Wallner, Wulf 1982). Neben der Implementation des zuvor erläuterten Stoffmodells für Salzgestein und verschiedenen Strategien zur Lösung nichtlinearer Spannungs-/Verformungsprobleme, enthält das Programm geeignete Rechentechniken, die eine realistische Erfassung gebirgsmechanischer Vorgänge (Ausbruch, Verfüllung, gebirgsmechanischer Ausbau u.a.) und die Simulation thermisch-mechanischer Wechselwirkungen erlauben.

5. Modellrechnungen

5.1 Bohrlochkonvergenz

Prij und Mengelers 1980 haben genaue Konvergenzmessungen an einem vertikalen, offenen Bohrloch in ca. 1000 m Teufe durchgeführt, die für einen Vergleich von Berechnungs- und Meßergebnissen herangezogen werden können (Wallner 1981 b). Im Rahmen der hier behandelten Problematik soll allerdings nur auf die berechnete Spannungsverteilung um das Bohrloch und deren zeitliche Änderung infolge der rheologischen Materialeigenschaften eingegangen werden.

In Abb. 2 sind die Radialspannung σ_r , die Umfangsspannung σ_φ und die Vertikalspannung σ_z in Abhängigkeit von der Entfernung zum Bohrloch zu den Zeitpunkten $t = 0, 0.1, 1.0, 3.5, 200$ und 1122 Tage dargestellt. Außerdem ist die Größe der Effektivspannung σ_{eff} (vgl. Abb. 1, Gl. 5) aufgetragen.

Unmittelbar nach Durchteufen des Meßhorizontes stellt sich aufgrund des elastischen Materialverhaltens die für $t = 0$ berechnete Spannungsverteilung ein: Die Vertikalspannung ist unverändert. Die Radialspannung sinkt vom isotropen lithostatischen Druck auf den Wert Null an der Bohrlochwandung ab. Die Umfangsspannung steigt an der Bohrlochwandung auf den doppelten Wert des lithostatischen Drucks.

Infolge des hohen Spannungsderivators in unmittelbarer Nähe des Bohrlochs kriecht das Salzgestein und entzieht sich somit der Spannungsaufnahme. Dies führt zu einer Spannungsumlagerung, bei der die Spannungsspitze abgebaut und zunehmend entfernt liegenden Gebirgsbereichen deviatorisch beansprucht werden.

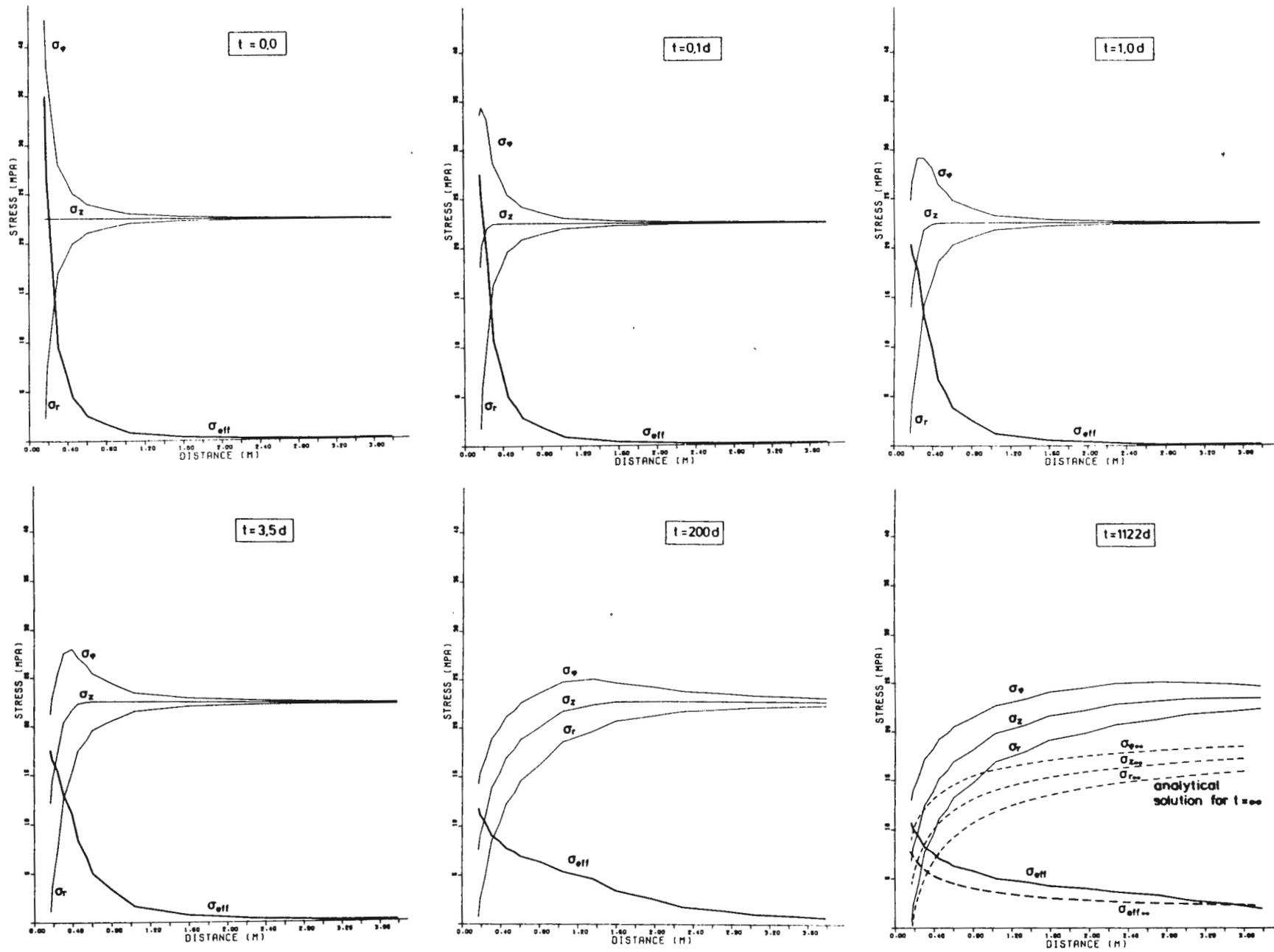


Abb. 2: Zeitliche Änderung der Spannungsverteilung um ein offenes Bohrloch

Aus den Spannungsverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten ist ersichtlich, daß sich der die Bohrlochkonvergenz maßgeblich beeinflussende Deviatorspannungszustand $\bar{\sigma}_{\text{eff}}$ zu Beginn sehr schnell verändert, im weiteren Verlauf sich aber nur sehr langsam einem stationären Zustand nähert. Dies ist die wesentliche Ursache für eine mit der Zeit abnehmende Konvergenzgeschwindigkeit.

Für die weiteren Betrachtungen zum Fracdruck soll festgehalten werden, daß der Spannungszustand um eine Bohrung im Salzgebirge im Gegensatz zu einer Bohrung im elastischen Gebirge nicht konstant ist, sondern sich im Laufe der Zeit ändert bis er einen stationären Wert erreicht hat. Dabei kann die gegen einen Innendruck sehr empfindliche Umfangsspannung σ_{φ} auf einen Wert unterhalb des lithostatischen Drucks reduziert werden.

5.2 Hydraulic-Fracturing

Für den Fall einer zylindrischen Bohrung ergibt sich in radialer Richtung folgende elastische Spannungsverteilung:

$$\sigma_r = (1 - \alpha^2) p_a + \alpha^2 p_i$$

$$\sigma_{\varphi} = (1 + \alpha^2) p_a - \alpha^2 p_i$$

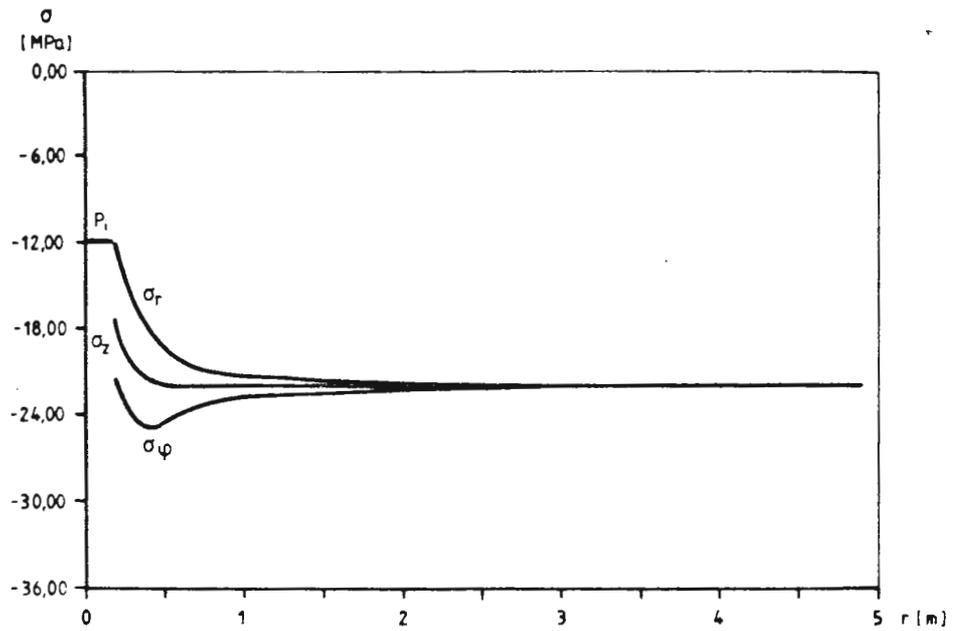
mit p_a = primärer lithostatischer Gebirgsdruck

p_i = Bohrlochinnendruck

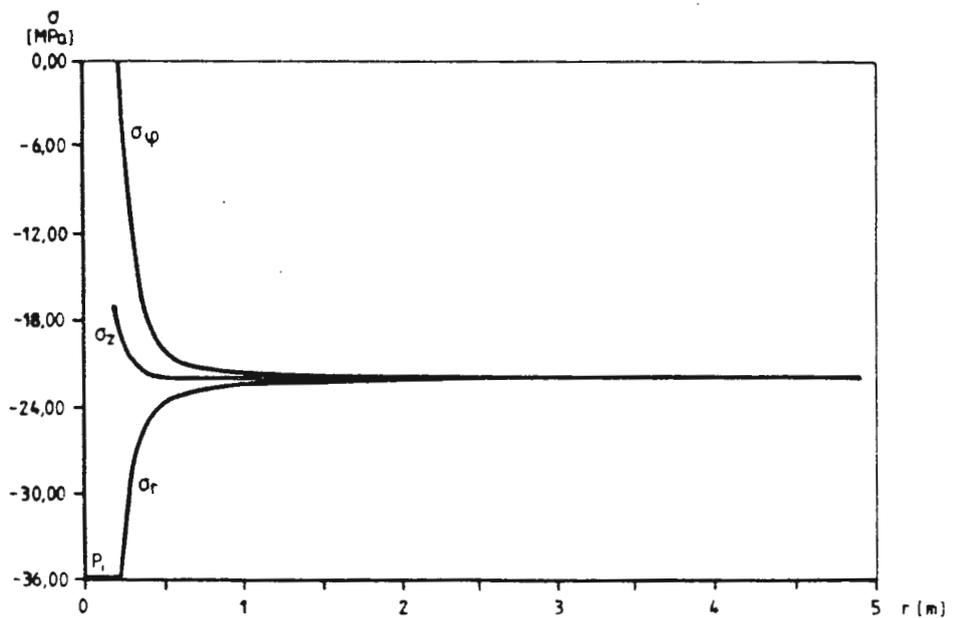
α = r_o/r

r_o = Bohrlochradius

r = radiale Entfernung von der Bohrlochachse



a) Spannungsverteilung nach 180 Tagen Standzeit



b) Spannungsverteilung während des Frac-Versuches

Abb. 3: Spannungsverteilung um ein laugegefülltes Bohrloch, Beginn und Ende des Frac-Versuches

Aus diesen Gleichungen ist leicht abzulesen, daß ein ansteigender Innendruck zu einer stetigen Druckerhöhung in radialer Richtung und in der Umfangsrichtung zu einer stetigen Druckentlastung führt. Bei elastischem Gebirgsverhalten bis zum Bruch werden von der Bohrlochwandung ausgehende Zugrisse erzeugt, wenn die Umfangsspannung σ_{φ} schließlich die Zugfestigkeit σ_t des Gebirges überschreitet. Daraus ergibt sich für den kritischen Innendruck (Frac-Druck):

$$P_i \text{ krit} = 2 p_a + |\sigma_t|$$

Diese Beziehung verliert jedoch ihre Gültigkeit, wenn das Kriechverhalten des Salzgebirges berücksichtigt wird.

In Abb. 3 sind exemplarisch die Ergebnisse der Berechnung eines Frac-Versuchs in einer laugegefüllten Bohrung in 1000 m Teufe dargestellt. Die Bohrlochkonvergenz als Folge der Kriech Eigenschaften ergibt für den 1000 m tiefen Bohrlochabschnitt nach 180 Tagen eine Spannungsverteilung, wie sie in Abb. 3a aufgetragen ist. Da die Umfangsspannung bereits erheblich reduziert ist, führt ein kleinerer als oben angegebener kritischer Innendruck $P_i \text{ krit}$ zur Ribbildung.

Die Umfangsspannung erreicht den Wert Null (Abb. 3b) bei einem Innendruck von 36 MPa, was etwa $1,6 p_a$ entspricht. Bei längerer Standzeit und insbesondere bei offenen Bohrlochern können sogar noch geringere Innendrucke kritisch werden.

5.3 Abschluß einer Speicherkaverne

Der dichte Abschluß einer Kaverne führt zu einem Druckaufbau im gespeicherten Medium, weil der unterschiedliche Druckgradient im Salzgebirge und im Kaverneninhalt auch noch langfristige Konvergenzen hervorruft, in deren Folge das gespeicherte Medium zusammengedrückt wird. Die Standsicherheit einer abgeschlossenen Kaverne ist daher entscheidend davon abhängig, ob während des natürlichen Druckaufbaus in der Kaverne eine progressive Rißbildung im Kavernendach bei Erreichen eines kritischen Innendrucks auftritt.

Diese Fragestellung wurde von Langer und Wallner im Auftrag der Akzo Zout Chemie, Hengelo, für eine Salzkaverne im Feld Zuidwending erstmalig nach neuesten ingenieurwissenschaftlichen Methoden untersucht. Der gewählte Berechnungsausschnitt ist in Abb. 4 angegeben. Für das Salzgebirge sind die charakteristischen rheologischen Eigenschaften zugrunde gelegt. Die Sole in der Kaverne wird durch spezielle Fluid-Elemente mit temperatur- und druckabhängiger Kompressibilität berücksichtigt. Das Rechenverfahren erlaubt die Erfassung der Wechselwirkung zwischen Sole und Gebirge.

Als charakteristische Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 5 der Druckanstieg im Kavernenfuß ① und im Kavernendach ② und in Abb. 6 die Spannungsverteilung in einem Radialschnitt im Kavernendach unmittelbar vor und 10 Jahre nach Verschluß der Kaverne dargestellt.

Man erkennt, daß der natürliche Druckaufbau relativ langsam erfolgt und daß das Deckgebirge während dieser Zeit in der Lage ist, die durch den Innendruck im Gebirge hervorgerufenen

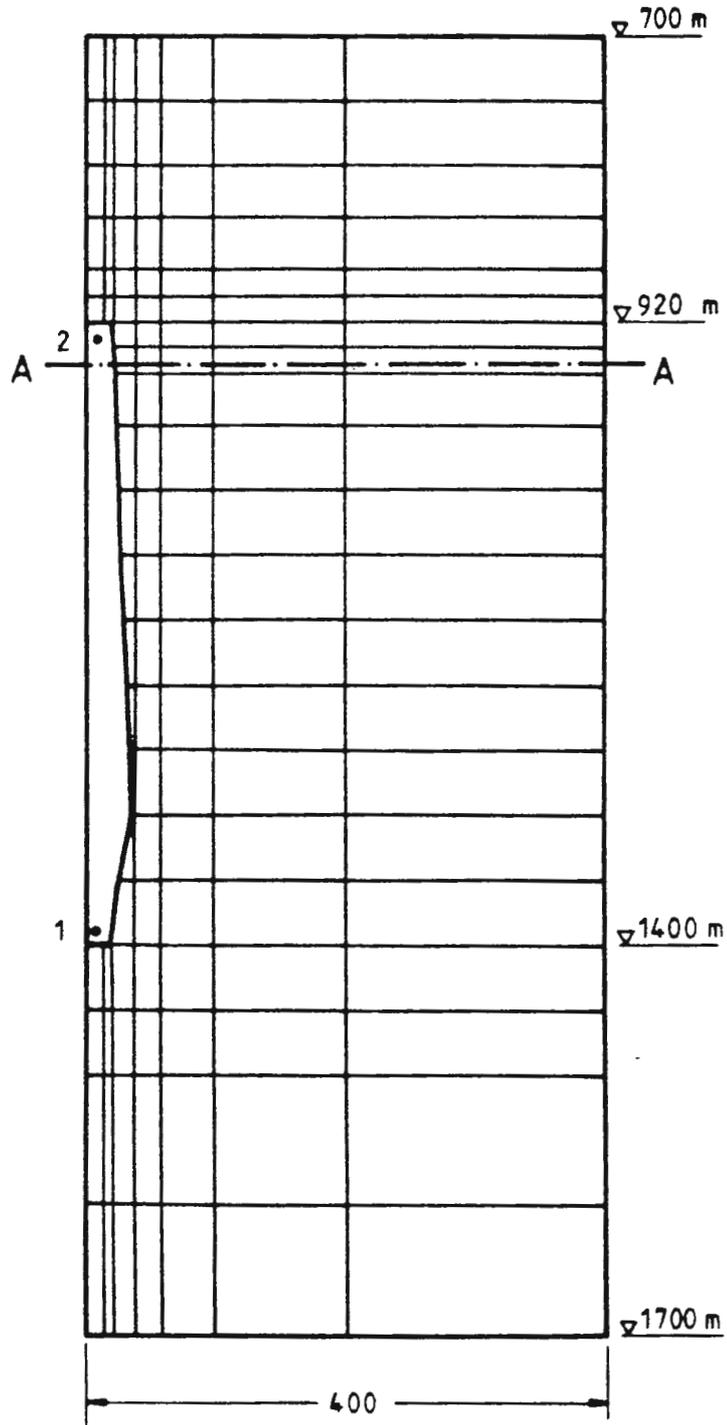
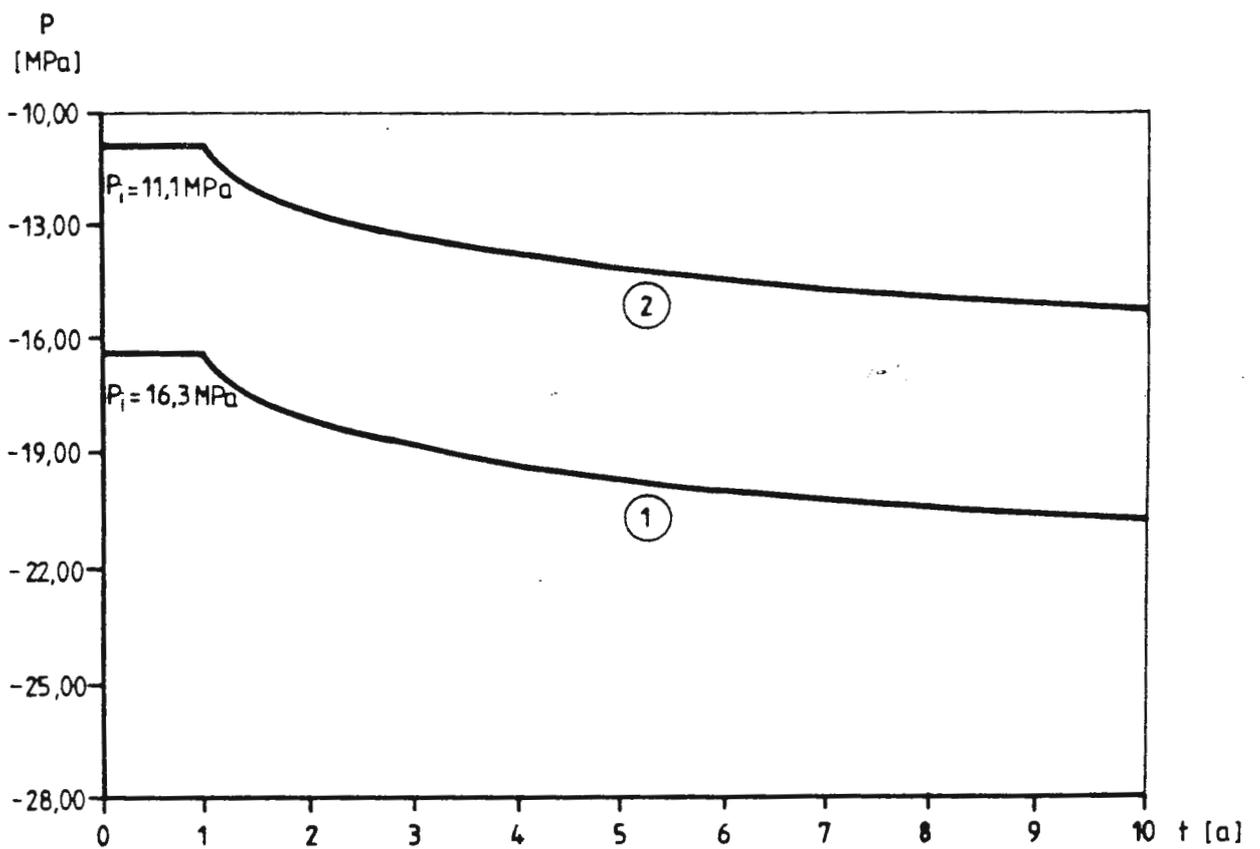


Abb. 4: Kaverne Zuidwending 3, Niederlande, Salzstock Veendam, Berechnungsausschnitt

Differenzspannungen durch Kriechen weitgehend abzubauen. Aus weiteren Ergebnissen, die hier nicht alle dargestellt werden können, ergab sich zusammenfassend, daß bei der vorliegenden Kavernengeometrie auch langfristig keine Rißbildung im Kavernendach zu erwarten ist.



① Kavernensohle } s. Abb. 4
② Kavernendach }

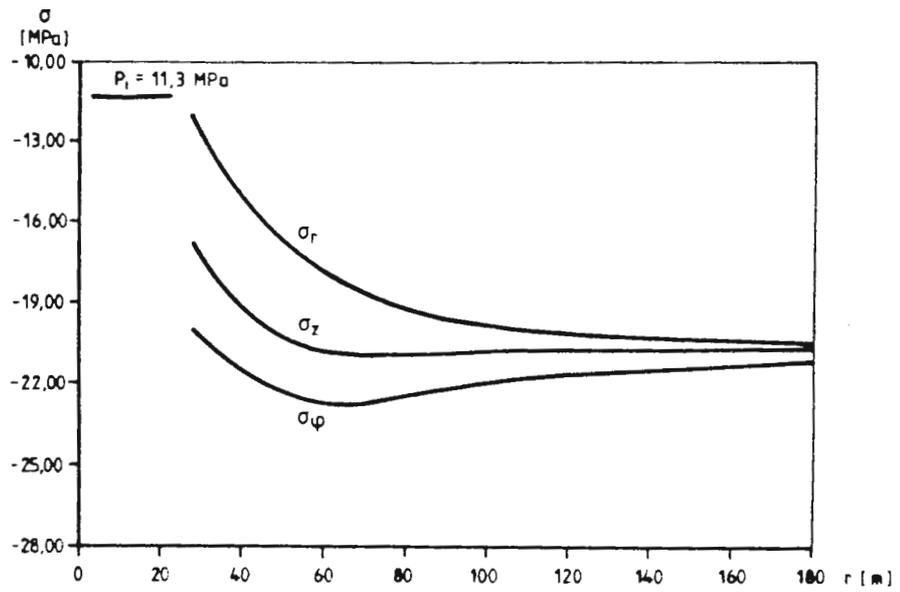
Abb. 5: Druckanstieg in der Kaverne

Neben der Frac-Gefährdung muß jedoch bei hohen Kavernen noch ein weiteres Problem betrachtet werden, das an einem sehr stark vereinfachten Beispiel in Abb. 7 erläutert werden soll. Im Unterschied zu einem kurzen, abgeschlossenen Bohrlochabschnitt, bei dem ein Ruhezustand eintritt, wenn der Innendruck im Bohrloch schließlich bis zum primären Gebirgsdruck angewachsen ist, kann bei einer hohen Kaverne ein entsprechendes Druckgleichgewicht über die gesamte Kavernenhöhe nicht erreicht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Druckgradienten im Salzgebirge ① und in der mit Sole gefüllten Kaverne ② stellt sich vielmehr der in Abb. 7 dargestellte stationäre Druckzustand ein. Im unteren Teil der Kaverne führen die höheren Spannungen im Gebirge auch nach Erreichen des Gleichgewichts an einer Durchmessererringerung. Im oberen Teil der Kaverne ist der Druck in der Sole größer als im Gebirge, so daß eine stetige Aufweitung eintritt.

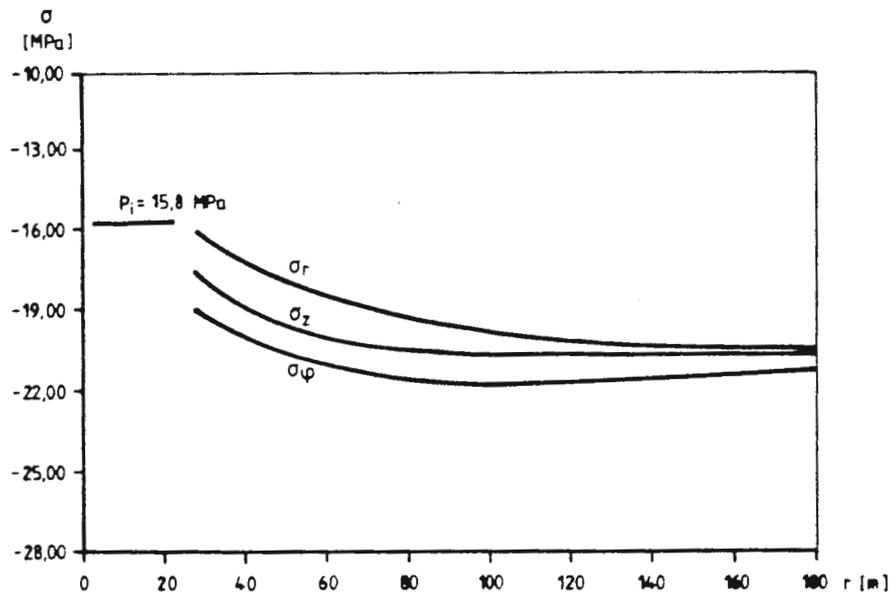
Dieser dynamische Gleichgewichtszustand stellt besondere Anforderungen an die Konstruktion eines dichten Kavernenabschlusses. Eine ausführliche Studie zu dieser Problematik ist z. Zt in Bearbeitung.

6. Zusammenfassende Bewertung

Die angeführten Berechnungsbeispiele verdeutlichen, daß der Frac-Druck im Deckgebirge ganz entscheidend von der zeitlichen Entwicklung des Druckes abhängt. Die rechnerische Lösung dieses Problems ist mit Hilfe geeigneter numerischer Rechenmodelle möglich.



a) unmittelbar vor Verschluss der Kaverne



b) 10 Jahre nach Verschluss der Kaverne

Abb. 6: Spannungsverteilung im Schnitt A-A (vgl. Abb. 4)

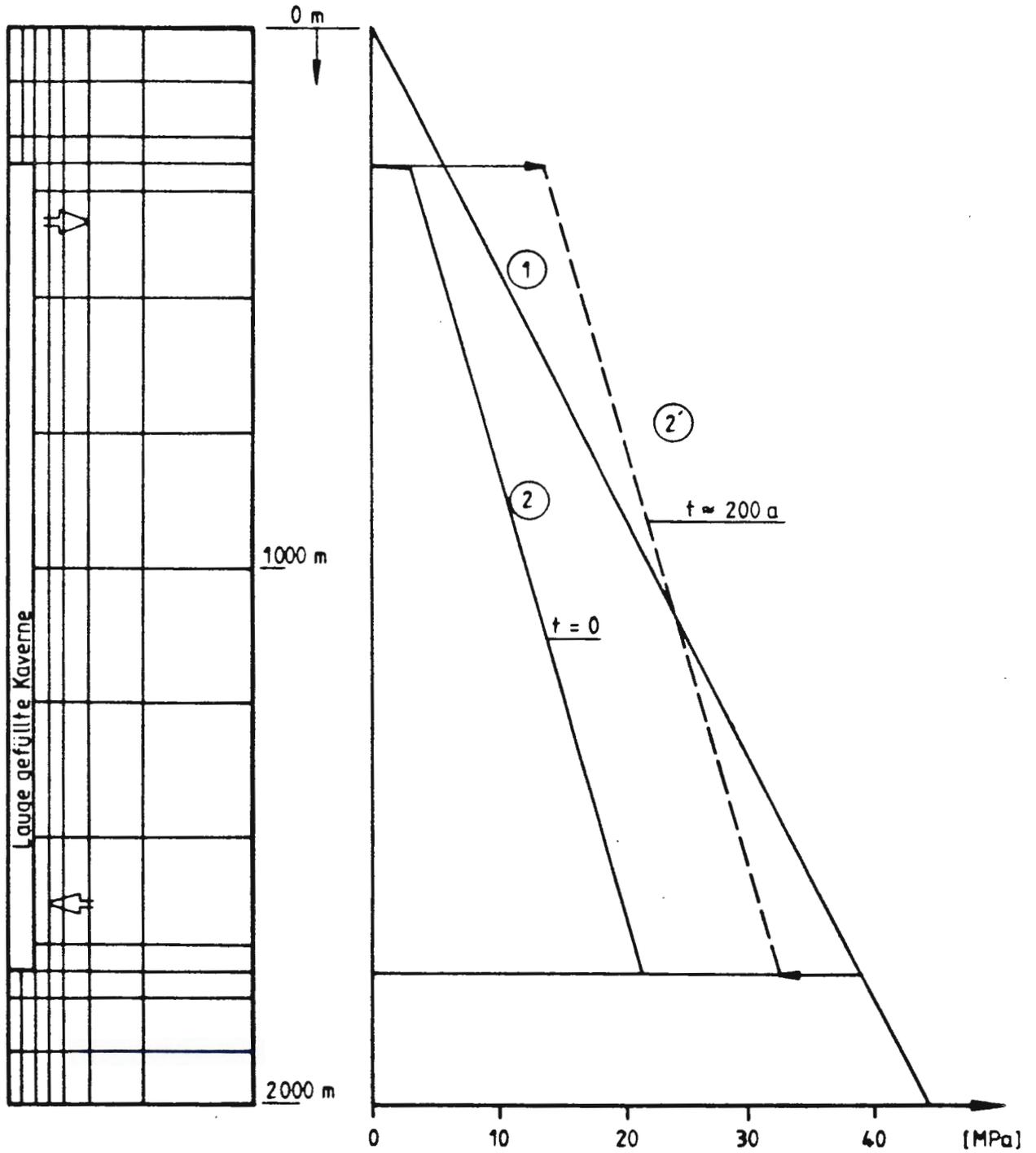


Abb. 7: Stationäre Konvergenz einer hohen Kaverne

Die Analyse verschiedener Berechnungen zum Frac-Druck ergab folgende Schlußfolgerungen:

- Die Größe des in Frac-Versuchen ermittelten kritischen Drucks hängt neben natürlichen Bedingungen auch von der Versuchsdurchführung ab, und zwar vom Zeitpunkt der Versuchsdurchführung und von der Druckaufbringungsgeschwindigkeit.
- Allein aus versuchstechnischen Gründen kann der Frac-Druck daher in weiten Grenzen schwanken: Ein oberer Wert ist durch die o.a. elastische Lösung gegeben. In Sonderfällen liegt der Frac-Druck auch unterhalb des lithostatischen Druckgradienten.
- Aus dem Frac-Druck kann nicht unmittelbar auf den primären Gebirgsdruck geschlossen werden.
- Es ist nicht zulässig, die aus Frac-Versuchen in Bohrlöchern gewonnenen Ergebnisse direkt auf den Fall einer abgeschlossenen Kaverne mit natürlichem Druckaufbau zu übertragen.
- Bei einer dicht abgeschlossenen Kaverne mit natürlichem Druckaufbau wirken die Kriecheigenschaften des Salzgesteins dem Frac-Druck entgegen. Ein nach konventionellen Methoden eingeschätztes Versagen durch progressive Ribildung im Kavernendach kann in vielen Fällen ausgeschlossen werden.
- Bei hohen, dicht abgeschlossenen Kavernen stellt sich mit der Zeit ein stationärer Verformungszustand ein, mit Konvergenzen im unteren Teil und Divergenzen im oberen Teil der Kaverne.

- Zur Interpretation von Frac-Versuchen und zur Bewertung der Frac-Druckgefährdung von Speicherkavernen sind begleitende rechnerische Analysen, die das rheologische Materialverhalten von Steinsalz berücksichtigen zwingend notwendig.

7. Anmerkung

Der Verfasser dankt der Akzo Zout Chemie, Hengelo, für die freundliche Genehmigung zur Veröffentlichung der Berechnungsergebnisse der Salzkaverne Zuidwending.

8. Schrifttum

Gloria, K. und Costinescu, A. (1978). In situ-Untersuchungen zur Ermittlung des zulässigen Druckgradienten für Gaskavernen im Steinsalz, Vortrag der 26. DGMK-Haupttagung, Berlin, Compendium 78/79, Band 1, Deutsche Gesellschaft für Mineralölwissenschaften und Kohlechemie e.V., S. 356-370.

Langer, M. (1979). Rheological behaviour of rock masses, Proc. 4th Int. Congr. on Rock Mechanics, Montreux, Vol. III, S. 29 - 96

Langer, M. (1982). Felsmechanische Probleme bei der Errichtung von Speicherkavernen, Proc. ISRM Symp. Rock Mechanics. Cavern and Pressure Shafts, Aachen, Vol. II, S. 947-960.

- Staupendahl, G., Gessler, K. und Wallner, M. (1982). Zusammenfassende Darstellung von Versuchsergebnissen zum spannungs- und temperaturabhängigen Festigkeits- und Verformungsverhalten von Steinsalzen, Proc. ISRM Symp. Rock Mechanics: Cavern and Pressure Shafts, Aachen, Vol. III, in print.
- Wallner, M., Caninenberg, C. und Gonther, H. (1979). Ermittlung zeit- und temperaturabhängiger mechanischer Kennwerte von Salzgesteinen, Proc. 4th Int. Congr. Rock Mechanics, Montreux, Vol. 1, S. 313 - 318
- Wallner, M. (1981a). Critical examination of conditions for ductile fracture of rock salt, Proc. OECD/NEA Workshop on Near Field Phenomena in Geologic Repositories for Radioactive Waste, Seattle p. 243-253
- Wallner, M. (1981b). Analysis of thermomechanical problems related to the storage of heat producing radioactive waste in rock salt, Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behaviour of Salt, The Pennsylvania State University, in print
- Wallner, M. and Wulf, A. (1982). Thermomechanical calculations concerning the design of a radioactive waste repository in rock salt, Proc. ISRM Symp. Rock Mechanics: Cavern and Pressure Shafts, Aachen, Vol. II, S. 1003-1012
- Wallner, M. (1983). Standsicherheitsberechnungen für die Pfeilerdimensionierung im Salzbergbau, Proc. 5th Int. Congr. on Rock Mechanics, Melbourne, Vol II, D9-D12

Het gebruik van in steenzout uitgeloopte holruimten in Nederland.

Th. H. Wassmann

Akzo Zout Chemie Nederland bv, Postbus 25
7550 GC Hengelo-Ov, Nederland.

SAMENVATTING

De zouthorsten in het noordoosten van ons land zijn door hun geïsoleerde ligging tot nu toe niet gebruikt voor de opslag van energiedragers, zoals aardgas of aardolie. De industriële centra, in hoofdzaak geconcentreerd in de randstad, zijn verbonden met het aardgasveld Slochteren en de velden op het Continentale Plat door een systeem van pijpleidingen en compressor stations. Ook wordt de Nederlandse en zelfs een deel van de Belgische en Duitse strategische oliereserve opgeslagen in de grote tankfarms in het Europoortgebied.

Gedwongen door deze feiten besloot AZC in het begin van de zestiger jaren tot een onderzoek naar andere gebruiksmogelijkheden voor haar ondergrondse holruimten in Groningen (Veendam) en Overijssel (Hengelo). Als eerste afvalprodukt werden de slurries uit de pekeldzuivering van de zoutfabriek te Hengelo definitief geborgen in de daarvoor geschikte zoutcavities. Enige jaren later werd tevens gestart met de berging van kleine hoeveelheden afgewerkte zoute boorspoeling. In de zeventiger jaren werden plannen uitgewerkt voor de berging van chemisch afval in voor dit doel speciaal aangelegde kleine holruimten in de zouthorst Veendam. Door de uiterst negatieve houding van de Nederlandse milieu ambtenaren is dit plan nooit gerealiseerd.

Op dit moment wordt een grote holruimte gebruikt voor de opslag van een geconcentreerde $MgCl_2$ -pekeld afkomstig van het Magnesiumbedrijf van Billiton te Veendam. Gezamenlijk met de in Nederland werkende oliemaatschappijen zijn plannen uitgewerkt en vergunningen aangevraagd voor de berging van het gehele scala aan boorspoelingen en -gruis afkomstig van boringen op het vasteland.

Een nieuw afvalprodukt voor de ondergrondse berging zou vliegias kunnen zijn uit de op steenkool gestookte elektriciteitscentrales.

NIEUW ONDERZOEK NAAR DE GEOTECHNISCHE EIGENSCHAPPEN VAN GECEMENTEERDE ZANDEN.

Inleiding

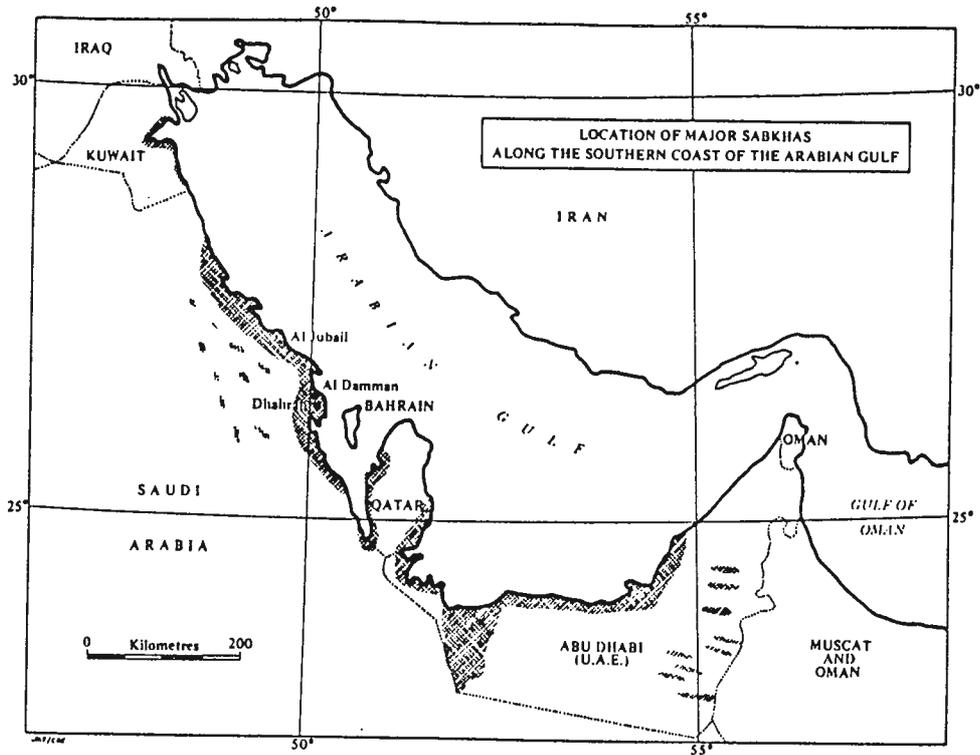
Bij de Sektie Ingenieursgeologie van de Afdeling der Mijnbouwkunde van de Technische Hogeschool Delft is onlangs een onderzoek naar de geotechnische eigenschappen van gecementeerde zanden van start gegaan. Het feit dat los zand zich kan verkitten, zodat uiteindelijk een harde zandsteen ontstaat, is niet onbekend. De processen die hiervoor verantwoordelijk zijn, zijn al sinds jaar en dag bestudeerd door geologen (met name sedimentologen), maar deze kennis is nog maar weinig toegepast bij geotechnische problemen. Het onderzoek van de Sektie probeert alle kennis die voor geotechnische projekten van belang kan zijn te verzamelen. De medewerking van bedrijven die op dit gebied ervaringen hebben opgedaan, is daarbij van essentieel belang.

Wat is cementatie?

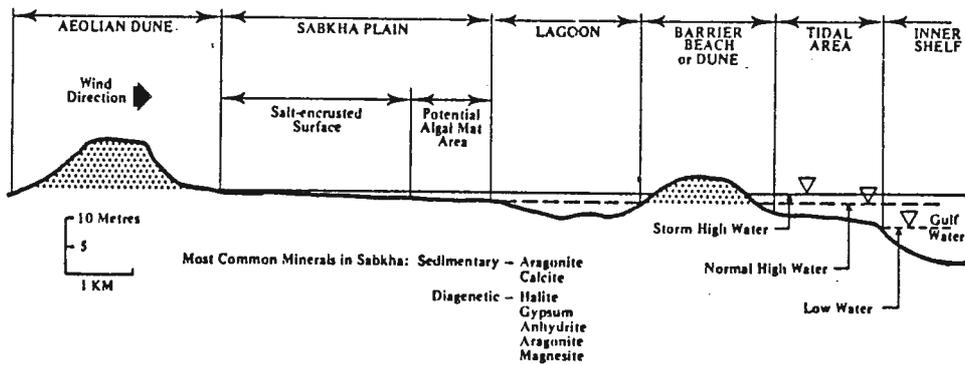
Het belangrijkste proces waardoor een zand in een zandsteen verandert, staat bij geologen bekend onder de naam "cementatie". De mineralen die de verbinding tussen de individuele korrels tot stand brengen, zijn meestal opgelost in het grondwater aanwezig. Als om de een of andere reden een overconcentratie ontstaat, dan zullen de mineralen uit het grondwater neerslaan en aldus de verkitting tot stand brengen. De mineralen kristalliseren eerst uit op de punten waar de korrels elkaar raken en later worden ook de overgebleven poriën opgevuld. De mineralen die zo een zand kunnen verharderen, zijn calcium carbonaat (calciet, aragoniet), ijzeroxiden, silikaat, zout en nog enkele minder vaak voorkomende mineralen.

Bij cementatie speelt het klimaat een belangrijke rol. Het neerslaan van de opgeloste mineralen wordt onder andere bevorderd door hoge temperaturen en een sterke verdamping. Dit is dan ook de reden van het veelvuldig voorkomen van recente zandstenen in het Midden Oosten en rond de Middellandse Zee. In de landen met een gematigd klimaat vindt ook cementatie plaats, maar dan op dieptes van 100 m of meer.

Een vooral in het Midden-Oosten bekend verschijnsel is de vorming van sabkhas (figuur 1) en caliches. In beide gevallen veroorzaakt sterke verdamping een capillaire werking in de bodem, zodat relatief koel



Map showing location of major Sabkhas along the southern coast of the Gulf.



Generalized cross section across a typical coastal Sabkha with typical surface features.

Figuur 1: Sabkhas aan de zuidelijke kust van de Perzische Golf (Akili & Torrance)

grondwater als het ware omhoog gezogen wordt. Als voldoende water verdampt is, zal aan of dicht onder de oppervlakte kalk neerslaan (caliche). Bevat het grondwater weinig kalk, dan zullen na verdere verdamping ook de goed oplosbare zouten neerslaan. Deze zouten kunnen aan de kust ook neerslaan uit verdampend zeewater en vormen dan meestal een harde korst die op de oudere afzettingen ligt (sabkha). De bovengenoemde gevallen zijn slechts twee voorbeelden van de vele milieus waarin cementatie kan optreden.

De sterkte van gecementeerd zand

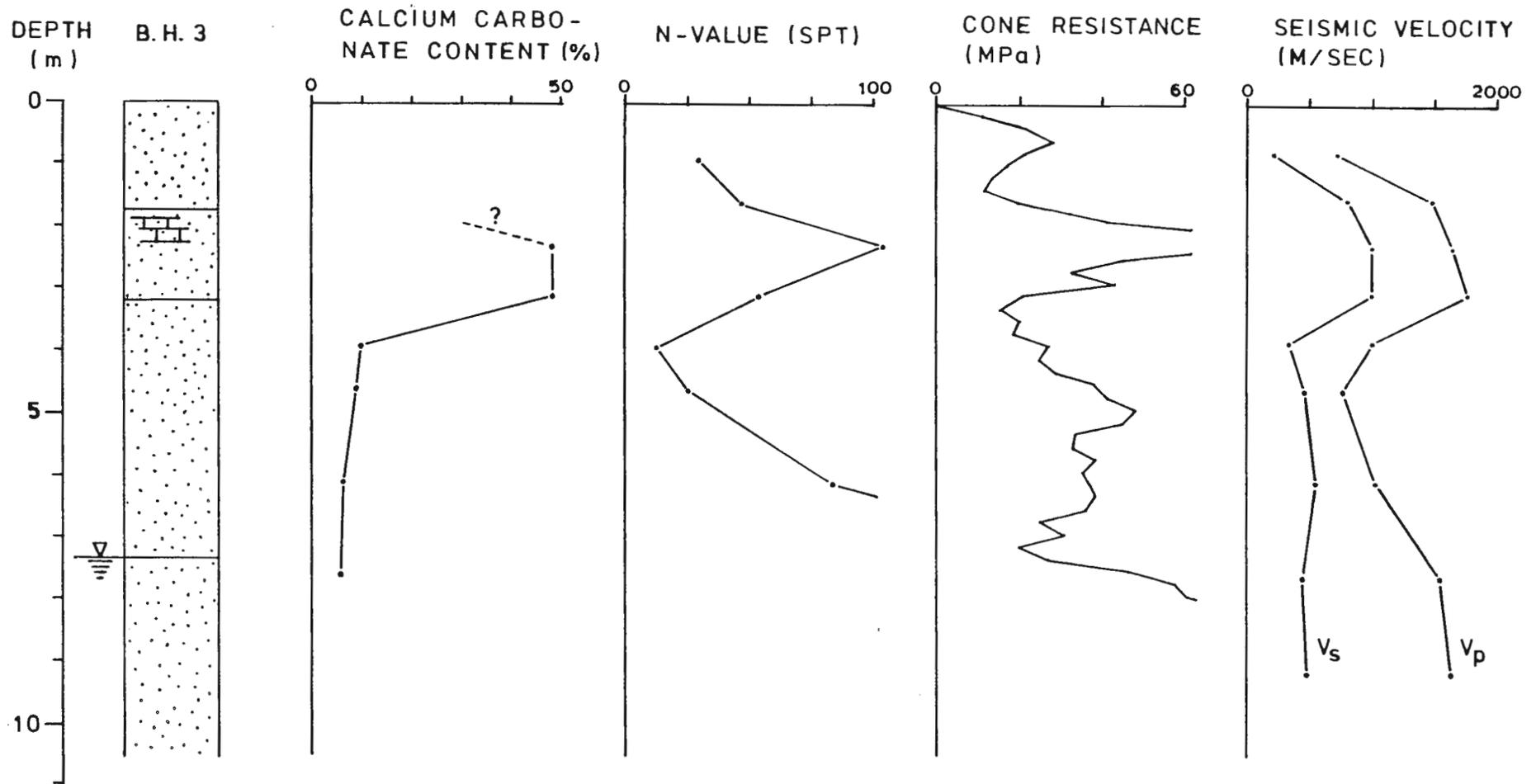
Daar het vrijwel onmogelijk is om van losse en zwak gecementeerde zanden ongeroerde monsters te nemen, zal het onderzoek van de Sektie zich concentreren op in-situ proeven zoals de Standard Penetration Test (SPT), sonderingen, geophysische methoden etc. De overgang van los zand naar harde zandsteen is geleidelijk en in de praktijk kan men met elke overgangsvorm te maken hebben. Het is zelfs niet ongebruikelijk dat men op een site een afwisseling van losse en gecementeerde zanden tegenkomt. Dit heterogene voorkomen maakt dat sommige onderzoekingsmethoden beter geschikt zijn dan andere. Bovendien blijkt dat de resultaten van standaardproeven die ontworpen zijn voor losse zanden niet zonder meer bruikbaar zijn in gecementeerde zanden. Zo is de uit de SPT gevonden waarde (de 'N-value') niet langer geschikt om de relatieve dichtheid van een zand uit te rekenen. De sterkte van de cementatie-bindingen speelt namelijk een overheersende rol.

De uit sonderingen verkregen conusweerstand zijn nutteloos als de cementatie verloren gaat ten gevolge van te grote deformaties die door belasting in de grond op kunnen treden. Tot nu toe is vastgesteld dat cementatie een bepaalde cohesie aan zanden geeft. De hoek van inwendige wrijving (ϕ) van een gecementeerd zand is nagenoeg even groot als die van een ongecementeerd zand. Als door deformatie (of door oplossing) de verbindingen tussen de korrels verbroken worden, dan neemt de cohesie af tot bijna nul en wordt de sterkte van het zand geheel bepaald door de inwendige wrijving. In figuur 2 zijn enkele resultaten uitgezet van een uitvoerig grondonderzoek dat door FUGRO B.V. in Saoedi Arabië is verricht. Dit onderzoek is gedaan ten behoeve van het ontwerpen van machine-funderingen. De seismische snelheden zijn bepaald met behulp van de 'crosshole' methode. Deze geophysische techniek is door FUGRO al veelvuldig met succes toegepast. Met behulp van deze resultaten kan op een betrouwbare manier het dynamische gedrag van de ondergrond voorspeld worden.

Baggeren van gecementeerd zand

Ook bij baggerwerkzaamheden moet men bedacht zijn op het feit dat zanden gecementeerd kunnen zijn. Weliswaar moet ons onderzoek op dit terrein nog van start gaan, maar 'common sense' doet inzien dat: a.: De mate waarin een zand verhard is, bepalend is voor de benodigde

Figuur 2 : Resultaten van een grondonderzoek in Saoedi Arabië. Op 2 à 3 m diepte is een gecementeerde zandlaag aangetroffen.



energie en de optimale methode om het zand te baggeren.

b.: Cementatie de zogenoemde 'stand-up time' verlengt; dit is de tijd waarover een steile helling (tussen een reeds gebaggerd gebied en een nog te baggeren zone) overeind blijft staan.

Samenwerking met het bedrijfsleven

De Sektie is van plan om laboratorium-onderzoek te gaan doen aan kunstmatig gecementeerde zanden. Het overgrote deel van de gegevens zal echter uit praktijkervaringen moeten komen. De samenwerking met FUGRO B.V. is al van start gegaan. Wij hopen dat ons onderzoek naar het baggeren van gecementeerde zanden binnenkort kan beginnen. Al degenen die in het onderzoek geïnteresseerd zijn; die suggesties willen doen en die van de vorderingen van het onderzoek op de hoogte gesteld willen worden, worden vriendelijk verzocht om contact op te nemen met ondergetekende.

Drs. Frank van den Bos
p/a Sektie Ingenieursgeologie
Afdeling der Mijnbouwkunde
Technische Hogeschool Delft
Postbus 5028
2600 GA DELFT
Tel.: 015-781326 of 782543

