

Vertrouwelijk

**BAMBUS project**  
*Nederlandse bijdrage*

A.D. Poley

Petten, 17 mei 2000

20038/00.30991/C

FAS-nummer 61273

In opdracht van EZ

---

auteur : A.D. Poley

beoordeeld: J. Prij

---

72 blz RE/AP/ES

goedgekeurd : R. Huiskamp

---

bambus.doc

---

© NRG 2000

Behoudens hetgeen met de opdrachtgever is overeengekomen, mag in dit rapport vervatte informatie niet aan derden worden bekendgemaakt en is NRG niet aansprakelijk voor schade door het gebruik van deze informatie.

## RESUMÉ

Dit rapport geeft een kort overzicht van de resultaten van het BAMBUS (Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories) project, dat tussen januari 1996 en december 1998 werd uitgevoerd door BGR (DE), ENRESA (ES), FZK (DE), G.3S (FR), GRS (DE), NRG (NL), en UPC (ES). Het project werd gefinancierd door de Europese Commissie en de nationale regeringen en overheden. Een compleet overzicht van het project is te vinden in het BAMBUS eindrapport. In dit rapport worden met name de Nederlandse bijdragen wat meer belicht.

Het BAMBUS project had tot doel het begrip voor het gedrag van zoutgruis navulling in een opslagfaciliteit in steenzout te verbeteren, het databestand van belangrijke fenomenen en processen in de faciliteit te vergroten, en de computercodes en daarin gebruikte materiaalwetten verder te ontwikkelen, die voor het voorspellen van deze processen nodig zijn. Het project was toegespitst op twee concepten voor opslag van warmtegenererend afval in een ondergrondse opslagfaciliteit in steenzout: (1) het galerijopslag concept en (2) het boorgatopslag concept. Het project was onderverdeeld in vier werkpakketten: in-situ experimenten, uitgevoerd in de Assemijn in Duitsland; laboratorium onderzoek van zoutgruis navulling; een benchmark oefening van materiaalmodellen voor zoutgruis navulling; en de ontwikkeling van thermomechanische modellen.

Het onderzoek in het BAMBUS project heeft laten zien dat het gedrag van zoutgruis navulling in een opslagfaciliteit in steenzout bepaald wordt door continue processen met een tamelijk eenvoudige drukopbouw. Deze processen worden nu kwalitatief goed begrepen en kunnen over een grote range van condities worden gesimuleerd. Er zijn enkele parameters geïdentificeerd die het verloop van deze processen grotendeels bepalen en waarvoor verder onderzoek nodig is om het voorspellend vermogen van de thermomechanische codes en de daarin gebruikte materiaalwetten te verbeteren. Door het experimenteel onderzoek is het databestand van de relevante parameters uitgebreid en zijn er algemene relaties afgeleid voor de onderlinge verbanden tussen porositeit, doorlaatbaarheid en thermische geleidbaarheid van zoutgruis.

## Inhoudsopgave

<b>Lijst van tabellen</b>	<b>5</b>
<b>Lijst van figuren</b>	<b>5</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>1 Het BAMBUS project</b>	<b>9</b>
1.1 Achtergronden van het BAMBUS project	9
1.2 Doelstellingen van het BAMBUS project	11
1.3 Organisatie van het BAMBUS project	12
1.4 Kennis voor het BAMBUS project	13
1.5 Uitvoering van het BAMBUS project	15
1.5.1 In-situ onderzoek	15
1.5.2 Laboratorium experimenten	16
1.5.3 Model benchmark	17
1.5.4 Thermomechanische berekeningen	18
<b>2 Resultaten van het BAMBUS project</b>	<b>19</b>
2.1 In-situ onderzoek	19
2.1.1 TSDE experiment	19
2.1.2 DEBORA-1 experiment	20
2.1.3 DEBORA-2 experiment	21
2.1.4 Vrije-convergentie boorgatexperiment	22
2.2 Laboratorium onderzoek	23
2.2.1 Zoutgruis compactietests	23
2.2.2 Zoutgruis doorlaatbaarheidstests	23
2.2.3 Thermische eigenschappen van zoutgruis	24
2.3 Model benchmark	24
2.3.1 Fase I: modelberekeningen aan simpele hypothetische problemen	25
2.3.2 Fase II: modelberekeningen aan laboratoriumtests	25
2.3.3 Fase III: modelberekeningen aan het TSDE experiment	26
2.4 Thermomechanische berekeningen	27
2.4.1 Thermomechanische analyses aan het TSDE experiment door FZK/INE	27
2.4.2 Thermomechanische analyses aan het TSDE experiment door ENRESA/CIMNE	28
2.4.3 Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door GRS	28
2.4.4 Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door UPC	29
2.4.5 Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door NRG	29
2.4.6 Thermomechanische analyses aan het 500m vrije-convergentie experiment door NRG	30
<b>3 In-situ experimenten</b>	<b>31</b>
3.1 DEBORA experimenten	31
3.1.1 Ontwerp DEBORA-1	31
3.1.2 Ontwerp DEBORA-2	34

3.1.3	Meetproblemen DEBORA-1 experiment	36
3.1.4	Reconstructie convergentiedata DEBORA-1	38
3.1.5	Kalibratie drukopnemers DEBORA experimenten	39
3.2	500m vrije-convergentie experiment	41
3.2.1	Voorgeschiedenis	41
3.2.2	Ontwerp en uitvoering	42
<b>4</b>	<b>Constitutief gedrag van droog zoutgruis</b>	<b>45</b>
4.1	Constitutieve relaties	45
4.1.1	Elastische rek	45
4.1.2	Kruiprek	47
4.1.3	Thermische rek	47
4.1.4	Compactierek (Callahan model)	47
4.1.5	Compactierek (Hein model)	48
4.2	Performance van het NRG model	50
4.2.1	Benchmark fase I	50
4.2.2	Benchmark fase II	51
4.2.3	Benchmark fase III	51
4.2.4	Discussie	52
<b>5</b>	<b>Modelberekeningen aan in-situ experimenten</b>	<b>53</b>
5.1	DEBORA experimenten	53
5.1.1	DEBORA 1	54
5.1.2	DEBORA 2	54
5.1.3	Vergelijking met andere partners	55
5.2	500-m vrije-convergentie experiment	57
<b>6</b>	<b>Evaluatie en conclusies</b>	<b>63</b>
6.1	Evaluatie	63
6.1.1	BAMBUS project algemeen	63
6.1.2	Nederlandse bijdrage	67
6.1.3	Toepassingen in andere CORA projecten	68
6.2	Conclusies	69
	<b>Referenties</b>	<b>71</b>

## Lijst van tabellen

tabel 1	Werkpakketten en bijdragen van de partners	12
tabel 2	Kruiprek parameters voor Asse steenzout	47
tabel 3	Best-fit parameterwaarden compactie reksnelheid	49
tabel 4	Vergelijking modelberekeningen en experimentele metingen	56
tabel 5	Temperaturen als functie van de diepte in het 500-m boorgat	60

## Lijst van figuren

figuur 1	Opzet DEBORA-1 experiment	32
figuur 2	Druk en temperatuur opnemer (Kulite Benelux B.V.)	33
figuur 3	Afstandopnemer (ECN-EE)	34
figuur 4	Opzet DEBORA-2 experiment	35
figuur 5	DEBORA-1 codeplaat met sleuven en corresponderende meetafstanden (mm)	38
figuur 6	Kalibratiemeting van de DEBORA drukopnemers	40
figuur 7	Opzet 500m vrije-convergentie boorgatexperiment	42
figuur 8	Bodem meetunit met convergentie en temperatuur opnemers	43
figuur 9	Bulkmodulus K op basis van meetdata WIPP en Asse zout	46
figuur 10	Vergelijking van het NRG model en het FZK model met de experimentele metingen	50
figuur 11	Eindige-elementen grid gebruikt door NRG voor de analyses van DEBORA 1 (links) en DEBORA 2 (rechts: 2-dimensionaal grid en onder: 3-dimensionaal grid)	53
figuur 12	Genormaliseerde convergentiekrommen	58
figuur 13	Fit-fout voor de 8 opnemers als functie van kruipexponent $n$ (1450 dagen)	59
figuur 14	Metingen en best-fit berekeningen van de boorgatdiameter op 1230 m diepte	59
figuur 15	Gesteentedruk als functie van de diepte gebaseerd op best-fit parameters voor $A$ en $n$	61



## Samenvatting

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de Nederlandse bijdragen aan het EU DG-XII 4<sup>de</sup> kaderproject BAMBUS (FI4W-CT95-0009), wat staat voor “**B**ackfill and **M**aterial **B**ehaviour in **U**nderground **S**alt **R**epositories”. Het BAMBUS project is tussen 1 januari 1996 en 31 december 1998 uitgevoerd door 8 Europese instituten uit vier landen: FZK-PTE, FZK-INE, BGR-IGG en GRS-ESF (Duitsland), ENRESA-DI en UPC-DIT (Spanje), G.3S (Frankrijk) en ECN-NE, later NRG-RE (Nederland). Het BAMBUS project had tot doel het gedrag van *droog* zoutgruis vast te stellen onder de gecombineerde invloeden van kruip van steenzout (convergentie) en temperatuur door warmteproductie in radioactief afval. Het BAMBUS project bestond uit 4 werkpakketten:

- WP1** Onderzoek met grootschalige experimenten in de Assemijn in Remlingen, Duitsland
- WP2** Laboratoriumonderzoek naar specifieke eigenschappen van zoutgruis
- WP3** Benchmark-berekeningen ter validatie van het gemodelleerde gedrag van zoutgruis
- WP4** Modelberekeningen aan de in-situ experimenten uitgevoerd in het BAMBUS project

NRG heeft deelgenomen aan alle werkpakketten van het BAMBUS project met uitzondering van WP2. Ongeveer de helft van de inspanning was gericht op het ontwerp, de fabricage, montage en plaatsing van de meetopstellingen (onder contract uitgevoerd door ECN-EE) in beide in-situ DEBORA experimenten, onderdeel van WP1. Een tweede zwaartepunt lag bij de ontwikkeling van een goede beschrijving van het constitutief gedrag van zoutgruis, het belangrijkste doel van WP3. De NRG-bijdrage aan WP4 bestond uit modelberekeningen aan beide DEBORA experimenten en het 500-m vrije-convergentie boorgatexperiment.

De belangrijkste resultaten van het BAMBUS project zijn beschreven in het BAMBUS eindrapport voor de Europese Commissie [1], evenals in het DEBORA eindrapport voor de Duitse overheid [2]. Het huidige rapport beperkt zich daarom tot achtergronden en toelichtingen bij de Nederlandse bijdragen aan het BAMBUS project<sup>1</sup>.

Voor de structuur van het huidige rapport is, evenals in het DEBORA rapport [2], aangesloten bij de structuur van het BAMBUS eindrapport [1], die gebaseerd was op de indeling in de werkpakketten van het BAMBUS project. Na een algemene inleiding over het BAMBUS project in hoofdstuk 1 en een samenvatting van de resultaten van het BAMBUS project in hoofdstuk 2, worden in de hoofdstukken 3, 4 en 5 de NRG-bijdragen aan de werkpakketten WP1, WP3 en WP4 beschreven; aan WP2 van het BAMBUS project is geen bijdrage geleverd. Hoofdstuk 6 tenslotte, bevat een evaluatie van de belangrijkste resultaten van het BAMBUS project, evenals een beoordeling daarvan gezien vanuit het Nederlands perspectief.

In de CORA projecten PASTA [3] en METRO-III [4] is gebruik gemaakt van de permeabiliteit-porositeit relatie die gevonden is in het BAMBUS-project. De in dit project afgeleide beschrijving van het compactiegedrag van droog zoutgruis was voor die projecten van minder belang.

---

<sup>1</sup> Dit betekent dat sommige delen van het rapport vaak beter te begrijpen zijn als de daarop betrekking hebbende delen van het BAMBUS eindrapport [1] ernaast worden gehouden!





# 1 Het BAMBUS project

## 1.1 Achtergronden van het BAMBUS project

Voor de eindberging van warmtegenererend radioactief afval in steenzout in de diepe ondergrond zijn de afgelopen decennia twee concepten ontwikkeld:

- 1) Het galerijopslag concept is voornamelijk ontwikkeld voor het opbergen van splijstof-elementen, maar kan ook worden gebruikt voor het opbergen van verglaasd hoogactief afval (HLW) als de HLW-vaten zijn verpakt in zelfafschermende containers. Bij dit concept worden de splijstofelementen verpakt in 65 ton zware zelfafschermende containers met een diameter van 1,6 m en een lengte van 5,9 m. Elke container kan 8 tot 10 PWR splijstofelementen bevatten, die ten tijde van het opbergen – na ongeveer 30 jaar tussenopslag – ongeveer 5 kW warmte produceren. De containers worden geplaatst in 200 m lange horizontale galerijen met een diameter van ongeveer 4 m. De galerijen zijn van elkaar gescheiden door 9 m brede zoutpilaren. Na plaatsing van de containers wordt het overgebleven volume nagevuld met zoutgruis. De ontwerpwaarde van de maximale oppervlaktemperatuur van 200 °C wordt binnen enkele decennia bereikt.
- 2) In het boorgatopslag concept worden vaten met verglaasd hoogactief afval op elkaar gestapeld in verticale boorgaten van 300 m lengte en 60 cm doorsnede, welke geboord worden vanuit galerijen van de opslagfaciliteit. De HLW-vaten, 43 cm in doorsnede en 1.35 m hoog, bevatten verglaasd opwerkingsafval van 1.1 ton afgewerkte brandstof. Ook bij dit concept is de ontwerpwaarde van de maximale oppervlaktemperatuur 200 °C. De ruimte tussen de boorgatwand en de vaten wordt nagevuld met zoutgruis om de drukbelasting van de gestapelde vaten te ontlasten naar het omringende steenzout. Ter isolatie van de HLW-vaten wordt de bovenste 30 tot 40 m van het boorgat nagevuld met zoutgruis.

In ontwerpen voor een opslagfaciliteit wordt de isolatie van het afval van de biosfeer verzorgd door een combinatie van technische en natuurlijke barrières:

- stabiel geconditioneerd afval en corrosiebestendige containers
- afdichtingen en navulmateriaal om restvolumina in de afvalfaciliteit te dichten
- het gastgesteente waarin de opslagfaciliteit wordt aangelegd, en
- de geologische lagen tussen het gastgesteente en de biosfeer.

Voor een opslagfaciliteit in steenzout is het gastgesteente de meest belangrijke barrière. Daarom is de interactie tussen het gastgesteente steenzout en het navulmateriaal van groot belang. Tengevolge van het kruipgedrag en het zelfherstellende vermogen van steenzout zullen, gedreven door gesteentespanningen, uitgegraven volumina worden gedicht waarbij eventueel bestaande transportwegen voor nucliden uit opgeslagen afval via pekels of gas worden afgesloten. Dit proces verloopt versneld bij verhoogde temperatuur. Om te mogen vertrouwen op de isolerende werking van de zeer lage doorlaatbaarheid van het gastgesteente moet breuk van het gesteente worden voorkomen, hetgeen betekent dat gezorgd moet worden voor constante kruipvervorming van het steenzout. Daartoe moeten de galerijen in de afvalfaciliteit zo snel mogelijk worden nagevuld met

een geschikt vulmateriaal. Dit materiaal moet het convergerend gedrag van het steenzout stabiliseren en (op den duur) een afdichting met zeer lage doorlaatbaarheid vormen vergelijkbaar met maagdelijk steenzout. Verder moet het vulmateriaal ook de vervalwarmte van het radioactief afval geleiden naar het gastgesteente en, in het geval van het boorgatopslag concept, de drukbelasting van de gestapelde vaten ontlasten naar het omringende gesteente.

In veiligheidsanalyses voor een dergelijke opslagfaciliteit moeten deze processen worden voorspeld met modellen, waarvan moet worden aangetoond dat ze de belangrijkste processen correct simuleren. Daarom is een goed begrip van het thermo-mechanische gedrag van het navulmateriaal noodzakelijk. Belangrijkste onderzoeksparameters zijn daarbij het tempo van de convergentie van nagevulde volumina en de compactie van het navulmateriaal als functie van de temperatuur, de gesteentedruk en de tijd.

Als meest geschikt navulmateriaal is zoutgruis gekozen. De voordelen van zoutgruis boven andere navulmaterialen zijn:

- 1) Tengevolge van de convergentie van open volumina in steenzout wordt zoutgruis gecompacteerd tot een dichte massa. Hierbij zijn meerdere processen te onderscheiden, zoals interne verplaatsing en vervorming. Door dit proces neemt de doorlaatbaarheid af tot zeer lage waarden, bijna gelijk aan die van maagdelijk steenzout.
- 2) Het fysische gedrag van zoutgruis is vergelijkbaar met dat van het omringende steenzout. Als gevolg daarvan levert nagevuld zoutgruis een continu toenemende tegendruk voor de gesteentedruk, die leidt tot een bijna homogene spanningsverdeling rond galerijen en boorgaten.
- 3) Zoutgruis, dat vrijkomt bij het uitmijnen van galerijen en boorgaten, is direct bij de hand.

De huidige plannen gaan ervan uit dat het navulmateriaal zal bestaan uit zoutgruis dat bij het uitmijnen van galerijen ontstaat; dit is een grofkorrelig materiaal met een maximale korrelgrootte van zo'n 60 mm. Voor het navullen van boorgaten zal een iets fijnkorreliger zoutgruis met een maximum korrelgrootte van 10 mm worden gebruikt. Gebaseerd op de ervaringen van de in-situ experimenten uitgevoerd in het BAMBUS project zal de initiële porositeit van het nagevulde zoutgruis ongeveer 35% bedragen.

## 1.2 Doelstellingen van het BAMBUS project

Het BAMBUS project richtte zich op de bepaling van het gedrag van zoutgruis navulling in een geologische afvalopslagfaciliteit voor warmteproducerend radioactief afval in steenzout. Vooraf waren als algemene doelen geformuleerd:

- de set meetdata voor de relevante verschijnselen en processen in nagevulde opslag galerijen en boorgaten te vergroten
- de kennis nodig voor het ontwerp en de beoordeling van opslagfaciliteiten te vergroten, en
- de bestaande thermo-mechanische modellen voor de voorspelling van het lange-termijn gedrag van een opslagfaciliteit te testen en te verfijnen

Met het oog op deze algemene doelen was het werk opgedeeld in vier werkpakketten, waarbij de pakketten 1 en 2 het experimentele deel omvatten en de pakketten 3 en 4 het modelonderzoek.

De in-situ experimenten (WP1) hadden tot doel zowel de kennis te verbreden als nieuwe data te verkrijgen met betrekking tot het gedrag van zoutgruis navulling en steenzout in en rond opslag galerijen en -boorgaten. Deze experimenten werden uitgevoerd onder omstandigheden die vergelijkbaar zijn met die welke worden verwacht in een opslagfaciliteit voor warmteproducerend afval, d.i. inclusief de gecombineerde effecten van warmte, convergentie en gesteentespanningen. De metingen vormden de basis voor de modelverbeteringen in programma's die het lange-termijn gedrag van een dergelijke faciliteit moeten simuleren. Ook kon met deze metingen de met deze programma's berekende ontwikkeling van de toestand van een faciliteit worden gevalideerd. Verder zijn de in-situ metingen gebruikt om de betrouwbaarheid van laboratoriummetingen te toetsen en om parameterwaarden in de beschrijvingen van het constitutief gedrag van zoutgruis en steenzout te checken die tot dan toe slechts uit laboratoriumtests waren afgeleid.

De laboratoriumexperimenten (WP2) hadden tot doel om een aantal specifieke eigenschappen van zoutgruis en hun onderlinge samenhang te onderzoeken die belangrijk werden geacht met het oog op de isolerende werking van de opslagfaciliteit. Een tweede doel was het verschaffen van data voor de bepaling van parameterwaarden voor beschrijvingen van het constitutief gedrag van zoutgruis. Ook zijn de laboratoriummetingen gebruikt bij de interpretatie van de in-situ metingen.

Om het effect onder opslagrelevante omstandigheden van het gemodelleerde constitutief gedrag in de verschillende programma's van de deelnemende partners te vergelijken zijn een aantal benchmark problemen gedefinieerd en berekend (WP3). Tegelijkertijd zijn deze problemen door de partners weer gebruikt om de modellen verder te verfijnen, waardoor de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de programma's kon worden verhoogd.

De thermomechanische berekeningen (WP4) werden uitgevoerd om de modellen te verfijnen in de beschikbare rekencodes voor de lange-termijn ontwikkeling van een opslagfaciliteit in steenzout en hun vermogen deze te simuleren te toetsen aan representatieve omstandigheden. Tegelijkertijd

konden de modelberekeningen weer worden gebruikt om de meetresultaten van de in-situ experimenten te interpreteren.

### 1.3 Organisatie van het BAMBUS project

Het BAMBUS project liep van 1 januari 1996 tot 31 december 1998. Het project werd gezamenlijk uitgevoerd door acht Europese partners uit vier landen:

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Duitsland
- Empresa nacional de residuos Radiactivos (ENRESA), Spanje
- Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (FZK/INE), Duitsland
- Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger des BMBF für Entsorgung (FZK/PTE), Duitsland
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Duitsland
- Groupement pour l'Etude des Structures Souterraines de Stockage (G.3S), Frankrijk
- Nuclear Research and Consultancy Group (NRG)<sup>2</sup>, Nederland
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Spanje

Belangrijke subcontracten waren afgesloten door GRS met DBE (Duitsland), door ENRESA met CIMNE (Spanje) en door BGR met W.S. Atkins (Verenigd Koninkrijk). De projectbijdragen van de partners aan de verschillende werkpakketten zijn weergegeven in tabel 1.

tabel 1 Werkpakketten en bijdragen van de partners

Werkpakket	Bijdragen
WP1 In-situ experimenten	BGR, GRS, NRG
WP2 Laboratoriumexperimenten	BGR, FZK/INE, GRS, G.3S
WP3 Benchmark studie	BGR, ENRESA(CIMNE), FZK/INE, GRS(DBE), G.3S, NRG
WP4 Thermomechanische berekeningen	BGR, FZK/INE, ENRESA(CIMNE), G.3S, NRG, UPC
Coördinatie	FZK/PTE

Een belangrijk onderdeel van het project management systeem werd gevormd door de Technische Commissie, welke bestond uit de verantwoordelijke projectleiders van de verschillende instituten en hun medewerkers, als ook uit een vertegenwoordiger van de Europese Commissie. De Technische Commissie kwam halfjaarlijks bijeen onder het voorzitterschap van de coördinator. Op deze bijeenkomsten werden de in tussentijd behaalde resultaten van de werkgroepen gepresenteerd en bediscussieerd, en werd ook het toekomstige werk gepland. De Technische Commissie vormde ook het belangrijkste platform voor de uitwisseling van informatie tussen experimentatoren en modellers. Daarnaast werden zonodig werkgroepbijeenkomsten gehouden

<sup>2</sup> Gedurende het grootste deel van de looptijd van het BAMBUS project werd dit werk uitgevoerd door de unit Nuclear Energy van ECN, die in Oktober 1998 is samengegaan met de nucleaire afdeling van KEMA. De ontwikkeling, fabricage en plaatsing van de meetopstellingen van de DEBORA experimenten is onder contract uitgevoerd door de unit Energy Efficiency van ECN.

om de organisatie van specifieke taken te regelen. Zo kwamen voor de benchmark studie (WP3) de deelnemers ook halfjaarlijks bijeen.

#### **1.4 Kennis voor het BAMBUS project**

De laatste decennia is veel onderzoek gedaan naar de eigenschappen van zoutgruis, dat gezien wordt als een geschikt navulmateriaal rond warmteproducerend radioactief afval in een opslagfaciliteit in steenzout. Het zwaartepunt lag daarbij op het compactiegedrag onder invloed van spanningen en warmte [5, 6, 7]. Andere belangrijke eigenschappen als de warmtegeleiding en de doorlaatbaarheid kregen minder aandacht. Het meeste van dit onderzoek vond plaats in laboratoria; grootschalig in-situ onderzoek startte pas rond 1990.

Het belangrijkste doel van het onderzoek naar het compactiegedrag was de ontwikkeling van modellen voor het constitutieve gedrag van zoutgruis. Het compactiegedrag wordt bepaald door verschillende processen als interne verplaatsing in het zoutgruis, elastische en niet-elastische viscoplastische en breuk-vervormingen van het zout. Al deze processen worden beïnvloed door randvoorwaarden als temperatuur, druk, spanningen en compactietempo. De constitutieve vergelijkingen bevatten dan ook een aantal parameters waarvan de waarden alleen door materiaalonderzoek kan worden bepaald.

Vanuit verschillende modelaannamen zijn meerdere constitutieve modellen ontwikkeld, waarbij gebruik is gemaakt van data uit meerdere laboratoriumstudies [8, 9, 10, 11, 12]. Toepassing van deze modellen lieten in sommige gevallen een slechte overeenkomst zien tussen de berekende en experimentele resultaten, waarmee duidelijk was dat verdere verfijning nodig was.

Een goed begrip van het compactiegedrag van zoutgruis vormt ook de basis voor de bepaling van andere eigenschappen die van belang zijn voor het veiligheidsgedrag van een opslagfaciliteit in steenzout, zoals de warmtegeleiding en doorlaatbaarheid van het zoutgruis, en de weerstand van het zoutgruis tegen compactie door de gesteentedruk. Deze eigenschappen zijn onderzocht in verschillende laboratoriumtests [13, 14, 15]. De omvang zowel als de overlap tussen de ranges die deze metingen bestreken was echter gering, daarom waren meer metingen nodig om de eerdere metingen te valideren en de range van randvoorwaarden zodanig te vergroten dat zij een voldoende basis vormen om algemeen toepasbare relaties af te leiden.

Omdat de afmetingen van experimentele meetapparatuur in laboratoria relatief klein zijn, moet noodzakelijkerwijs bij laboratoriumproeven gebruik worden gemaakt van zoutgruis met relatief kleine korrelgrootten, dat daarom niet volledig representatief is voor het beoogde grovere zoutgruis navulmateriaal in een opslagfaciliteit. Omdat het onderzoek naar gekoppelde processen in één en dezelfde de kleinschalige laboratoriumproef lastig is worden normaliter de processen in verschillende proeven apart onderzocht. Om die reden is toen begonnen met grootschalige in-situ experimenten om het gedrag van zoutgruis te onderzoeken onder omstandigheden die in een opslagfaciliteit in steenzout verwacht kunnen worden.

Het eerste grootschalige in-situ experiment, genaamd “Thermal Simulation of Drift Emplacement (TSDE)”, werd ontwikkeld aan het eind van de tachtiger jaren [16] en had tot doel de omstandigheden na te bootsen zoals die zich voordoen bij het galerijopslag concept. Dit experiment startte in september 1990 en maakte in de laatste jaren van de operationele fase deel uit van het BAMBUS project. Naast dit TSDE experiment werden in het midden van de negentiger jaren twee in-situ experimenten ontwikkeld om de omstandigheden in het boorgatopslag concept na te bootsen, genaamd “Development of Borehole Seals for High Level Radioactive Waste (DEBORA)” [17]. Deze experimenten zijn uitgevoerd in het BAMBUS project: DEBORA-1 had tot doel het gedrag van het zoutgruis in de ringvormige ruimte tussen de afvalvaten en het boorgat te onderzoeken, terwijl met DEBORA-2 het gedrag van het zoutgruis in het afsluitende bovenste deel van het boorgat werd onderzocht.

Om de lange-termijn ontwikkeling van een opslagfaciliteit in steenzout na te kunnen gaan zijn computerprogramma's nodig die de gecombineerde effecten van de thermomechanische processen op het gedrag van de zoutgruis navulling en het steenzout gastgesteente kunnen simuleren. Daartoe zijn meerdere codes ontwikkeld waarmee ondermeer de temperatuurontwikkeling, de compactie van het navulmateriaal en de vervormingen van het steenzout kunnen worden berekend [18, 19, 20, 21]. De meeste van deze codes konden de verschillende processen slechts apart (ontkoppeld) doorrekenen. Modelverificatie was slechts beperkt mogelijk door vergelijking van de rekenresultaten met de resultaten van kleinschalige laboratoriumtests, voor de overige modellen ontbraken voldoende meetgegevens. Dit vroeg duidelijk om aanvullende laboratoriumproeven en daarnaast de mogelijkheid deze codes te toetsen aan grootschalige in-situ experimenten.

Zoals eerder genoemd, vormt de isolerende container rond het afval een belangrijke technische barrière tussen het afval en het gastgesteente. Om duurzame containers te ontwikkelen moet een containermateriaal worden gekozen dat bestand is tegen het corrosieve chemische milieu onder de fysische omstandigheden dat in een opslagfaciliteit in steenzout kan worden verwacht. Omdat in de in-situ experimenten deze omstandigheden zo goed mogelijk worden nagebootst konden deze gebruikt worden om eerdere laboratoriumtests te valideren. Daartoe werden zowel in het TSDE-experiment als in het DEBORA-1 experiment op strategische plaatsen materiaalmonsters aangebracht die na afloop van de experimenten werden onderzocht.

Zowel door corrosie van containermateriaal als door thermische en radiologische ontbinding van het navulmateriaal of het gastgesteente zal zich gas vormen in de opslagfaciliteit. Dit gas zou het chemische milieu rond het opgeslagen afval kunnen beïnvloeden en daarmee de vrijzetting van radionucliden uit de afvalvaten. Gas zou ook het nuclidetransport uit de opslagfaciliteit kunnen vergroten. De gasontwikkeling en het gastransport in een steenzout opslagfaciliteit is onderzocht zowel middels in-situ als laboratoriumtests [22]. Ook in de in-situ experimenten van het BAMBUS project is gas-gerelateerd onderzoek uitgevoerd: in het TSDE experiment is de gas-samenstelling in de buurt van de materiaalmonsters bepaald, terwijl in de DEBORA experimenten de doorlaatbaarheid van het nagevulde zoutgruis is gemeten. Om de relatie tussen porositeit en doorlaatbaarheid te bepalen is de doorlaatbaarheid van zoutgruis in laboratoriumtests gemeten.

## 1.5 Uitvoering van het BAMBUS project

Het BAMBUS project bestond uit twee belangrijke delen: experimenteel onderzoek (in-situ experimenten en laboratoriumproeven) en modelstudies (een benchmark exercitie en een thermo-mechanische modelstudie). Tijdens het gehele project was er een intensieve samenwerking tussen experimentatoren en modelleurs.

### 1.5.1 In-situ onderzoek

De in-situ experimenten, het hart van het BAMBUS project, werden uitgevoerd in de Asse zoutmijn, een voormalige zoutproductiemijn in centraal Duitsland. Tussen 1906 en 1964 zijn in deze mijn tussen een diepte van 490 m en 750 m zo'n 140 kamers uitgegraven met een totaal volume van rond 3,5 miljoen m<sup>3</sup>. Namens de Duitse overheid werd in 1965 de GSF (Gesellschaft für Strahlenforschung) de nieuwe eigenaar van de mijn. Tussen 1967 en 1978 werd in de Assemijn experimenteel onderzoek gedaan naar de opberging van laag- en middelactief afval. Tijdens deze periode werden rond 125.000 vaten met laag-actief afval opgeslagen in kamers op een diepte van 750 m en 725 m. Ook werden zo'n 1300 vaten middel-actief afval opgeslagen in een speciaal daarvoor aangelegde kamer op 511 m diepte.

Sinds 1979 is de Assemijn nog uitsluitend gebruikt als een ondergronds onderzoekslaboratorium voor het uitvoeren van in-situ onderzoek in verband met de opslag van warmteproducerend radioactief afval in steenzoutformaties. De in-situ experimenten werden uitgevoerd op een diepte van 800 m, 50 m lager dan de eerder uitgegraven kamers, in een deel van de zoutpijler dat niet verstoord was door eerdere mijnbouwactiviteiten. De bedoeling was om de experimenten onder omstandigheden uit te voeren die zo min mogelijk beïnvloed zouden zijn door het eerdere gebruik van de zoutmijn.

#### TSDE experiment

Het TSDE experiment had betrekking op het galerijopslag concept beschreven in paragraaf 1.1. Het is uitgevoerd in een testveld dat bestaat uit twee galerijen waarin elk drie elektrisch verhitte containers werden geplaatst. Het restvolume van de galerijen werd nagevuld met zoutgruis. De afmetingen van de galerijen, de scheidende zoutpijler en de containers zowel als de warmteproductie en massa van de containers kwamen globaal overeen met die van het galerijopslag concept. Het experiment was meer dan 8 jaar operationeel, tussen september 1990 en 1 februari 1999. In de periode tot 2002 zal het experiment deels ontmanteld worden met het doel de metingen te valideren.

#### DEBORA-1 experiment

Het DEBORA-1 experiment had betrekking op het gedrag van zoutgruis navulling van de ringvormige ruimte tussen HLW-vaten en de boorgatwand voor het boorgatopslag concept. Het experiment werd uitgevoerd in een ca. 15 m diep boorgat met een doorsnede van 60 cm geboord vanaf een galerij op 800 m diepte in de Assemijn op een afstand van zo'n 100 m van het TSDE

experiment. In het onderzoeksboorgat werden de HLW-vaten gesimuleerd door een starre cilinder voorzien van elektrische heaters die totaal 9 kW warmte produceerden. Het experiment werd op 17 februari 1997 opgestart en afgesloten op 13 maart 1998 toen geen relevante nieuwe meetgegevens meer konden worden verwacht. Toen de temperaturen voldoende gedaald waren is het DEBORA-1 experiment ontmanteld, waarna naonderzoek is verricht op corrosiemonsters, zoutgruismonsters en de meetinstrumenten.

#### DEBORA-2 experiment

Het DEBORA-2 experiment had tot doel het gedrag van zoutgruis in de afsluiting van een boorgat voor HLW-opslag te onderzoeken. Hiertoe werd een apart experiment opgezet, enerzijds omdat de dimensies van de boorgatafsluiting relevant verschillen van die van de ringvormige ruimte tussen de HLW-vaten en de boorgatwand, anderzijds omdat hiervoor een grover zoutgruis zou worden toegepast. Dit experiment werd uitgevoerd in boorgat op ongeveer 15 m afstand van het DEBORA-1 experiment, eveneens 15 m diep en met een diameter van 60 cm. Om de convergentie van het boorgat te versnellen werden rondom het boorgat 4 externe heaters aangebracht op rond 1 m van het centrum van het boorgat. Het experiment werd opgestart op 22 september 1997 en werd op 4 december 1998 afgesloten.

#### Vrije-convergentie boorgatexperiment

Het vrije-convergentie boorgatexperiment werd uitgevoerd in een 500 m diep, initieel 600 mm diameter boorgat dat begin 1994 werd geboord vanaf een galerij op een diepte van 750 m. Het voornaamste doel van het boren van dit boorgat was aan te tonen dat boorgaten van dergelijke dimensies konden worden geboord vanuit ondergrondse mijnkamers met behulp van de droogboor techniek. Omdat het boorgat ver verwijderd was van de voormalige zoutproductiekamers, kan gevoeglijk worden aangenomen dat de gesteentedruk op de bodem van dit boorgat gelijk is aan de lithostatische druk. Daarom werd besloten in dit boorgat in-situ (1) het verband tussen de boorgat-convergentie en de gesteentedruk te onderzoeken aan de hand van de convergentie onder in het boorgat en (2) uit de boorgatconvergentie op geringere diepten de gesteentedruk te bepalen waar deze verstoord is tengevolge van de voormalige mijnbouwactiviteiten. Daartoe werd de boorgat-convergentie continu gemeten op vier diepten in het boorgat. De resultaten van deze metingen werden gebruikt om parameterwaarden te bepalen voor de beschrijving van het kruipgedrag van steenzout. Details van het vrije-convergentie boorgatexperiment zijn te vinden in hoofdstuk 3.

### *1.5.2 Laboratorium experimenten*

#### Zoutgruis compactieproeven

In het BAMBUS-project zijn een groot aantal zoutgruis compactieproeven uitgevoerd onder omstandigheden zoals die in een opslagfaciliteit kunnen worden verwacht: bij verhoogde temperatuur en compactiespanningen en lage compactietempi. De proeven werden voornamelijk uitgevoerd in triaxiaal drukcellen van diverse dimensies op materiaal verkregen uit de Assemijn. De maximale korrelgrootte in de proeven werd daarbij beperkt tot een tiende van de karakteristieke testdimensie, die voor de verschillende testopstellingen uiteenliep tussen 50 mm en



300 mm. De hoogste temperatuur was daarbij 200 °C, de beoogde ontwerptemperatuur in de opslagfaciliteit. De hoogst toegepaste compactiedruk was 70 MPa die, hoewel niet-relevant voor de omstandigheden in een opslagfaciliteit, nodig was om binnen de beperkte beschikbare tijdsduur beoogde compactietoestanden te bereiken. De minimum compactietempi lagen tussen  $10^{-9}$  en  $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ , tempi die ook in een opslagfaciliteit worden verwacht.

#### Doorlaatbaarheid van zoutgruis

Door middel van doorlaatbaarheidsproeven werd de ontwikkeling van de doorlaatbaarheid bij toenemende compactie onderzocht. Direct na plaatsing van het afval en navulling van het restvolume met zoutgruis is de doorlaatbaarheid van het zoutgruis hoog, maar de isolerende werking van het zoutgruis neemt in de loop van de tijd toe door compactie, hetgeen nog versneld wordt bij verhoogde temperaturen. De samenhang tussen doorlaatbaarheid en porositeit werd gemeten om de barrièrewerking van het zoutgruis te kunnen nagaan. Samen met eerdere meetresultaten kon een algemene relatie tussen beide eigenschappen worden vastgesteld.

#### Thermische eigenschappen van zoutgruis

Voor het bepalen van de thermische geleiding, de thermische diffusiviteit en de warmtecapaciteit van zoutgruis zijn een serie laboratoriumproeven uitgevoerd. Deze eigenschappen zijn nodig voor de berekening van de temperaturen in een opslagfaciliteit en vormen daarmee een basis voor de thermomechanische berekeningen. De tot dan toe gebruikte waarden waren afkomstig uit een zeer beperkt aantal laboratoriumproeven. Door het uitvoeren van deze metingen werd het aantal meetdata belangrijk vergroot en konden bruikbare relaties worden ontwikkeld voor de samenhang van de thermische eigenschappen met de porositeit.

De resultaten van de laboratoriumproeven zijn te vinden in hoofdstuk 3 van het eindrapport van het BAMBUS project [1].

#### *1.5.3 Model benchmark*

Een belangrijk onderdeel van het BAMBUS project was de “Comparative Study on Crushed Salt (CS)<sup>2</sup>”, waaraan zes modelgroepen deelnamen. Deze benchmark had tot doel:

- de verdere ontwikkeling van modellen om het gedrag van zoutgruis onder opslagrelevante omstandigheden te voorspellen;
- de verschillende modelbenaderingen voor de beschrijving van het zoutgruisgedrag met elkaar te vergelijken; en
- een platform te vormen voor de uitwisseling van modelkennis op het gebied van zoutgruisgedrag.

De benchmark was opgebouwd uit drie opeenvolgende fasen met toenemende complexiteit:

Fase 1: Benchmark berekeningen voor simpele hypothetische problemen om de constitutieve modellen in de beschikbare codes te checken en hun numerieke mogelijkheden vast te stellen.

Fase 2: Vergelijkende berekeningen voor specifieke laboratoriumtests met het doel de constitutieve modellen verder te verfijnen en te valideren.

Fase 3: Numerieke modellering van het TSDE experiment en een vergelijking tussen experimentele en berekende resultaten. Voor deze laatste fase werden de gekalibreerde constitutieve modellen uit fase 2 gebruikt.

Deze benchmark hielp de modellers hun modellen te verbeteren en hun begrip van de te modelleren processen te verbeteren. Aan het eind van het project waren alle modelgroepen in staat alle benchmark problemen naar voldoening door te rekenen. Details van de benchmark problemen en de uitvoering ervan zijn te vinden in hoofdstuk 4 van het eindrapport van het BAMBUS project [1]. De ontwikkeling van het NRG-model voor het constitutieve gedrag van zoutgruis is beschreven in hoofdstuk 4 van dit rapport.

#### *1.5.4 Thermomechanische berekeningen*

Terwijl de benchmark zich vooral op de modellering van het zoutgruis concentreerde, werd in de thermomechanische berekeningen de modellering van de gecombineerde thermische, thermomechanische en hydraulische processen in de opslagfaciliteit getoetst, i.e. de nagevulde galerijen en boorgaten en het omringende steenzout. Om de modellen die nodig zijn voor het ontwerp van de opslagfaciliteit en de daarvoor benodigde veiligheidsanalyses te verbeteren werden twee typen berekeningen uitgevoerd: (1) berekeningen voor het ontwerp van de in-situ experimenten, en (2) voorspellende berekeningen, zowel bruikbaar voor de interpretatie van de experimentele meetresultaten als voor hun extrapolatie in de tijd. Voor het TSDE experiment werden de ontwerpberoekeningen uitgevoerd in de voorbereidingsfase aan het eind van de tachtiger jaren. Voor de DEBORA experimenten werden de ontwerpberoekeningen uitgevoerd in de eerste fase van dat project. De voortdurende uitwisseling van informatie tussen modellers en experimentatoren was zeer belangrijk voor zowel de modelontwikkeling als de interpretatie van de meetresultaten.

## 2 Resultaten van het BAMBUS project

In dit hoofdstuk worden in kort bestek de belangrijkste resultaten van het BAMBUS project beschreven. Achtereenvolgend passeren de resultaten van de vier werkpakketten de revue.

### 2.1 In-situ onderzoek

#### 2.1.1 TSDE experiment

Het grootschalige TSDE experiment had tot doel de ontwikkeling van een galerijopslag van warmteproducerend afval na te bootsen. Dit experiment bestond in essentie uit twee met zoutgruis nagevulde galerijen waarin zich elk drie verhitte containers met de dimensies van POLLUX-containers bevonden. Tijdens het BAMBUS project werden geen grote veranderingen meer waargenomen in de ontwikkeling van het experiment.

- *Temperaturen stabiel*

De oppervlakte-temperaturen op de containers, die gedurende de eerste paar maanden van het experiment snel waren opgelopen van de initiële 35 °C naar 205 °C, waren in de jaren daarna tengevolge van de toenemende geleidbaarheid van de compacterende zoutgruis navulling afgenomen tot waarden tussen 165 °C en 175 °C. Deze temperaturen bleven tijdens de loop van het BAMBUS project stabiel rond 170 °C. In het omringende steenzout in de buurt van de verhitte containers steeg de temperatuur veel langzamer en bereikte rond februari 1997 een stabiel niveau. De temperaturen in het zoutgruis op vloerniveau en tegen de galerijwanden nam nog steeds langzaam toe tot waarden van respectievelijk 125 °C en 90 °C à 100 °C. In de niet-verwarmde delen van de galerij werden temperaturen van zo'n 50 °C in het zoutgruis gemeten. De temperatuurontwikkeling in het experiment verliep volgens verwachting.

- *Convergentie van de galerijen stabiel*

Vanaf enkele weken na het opstarten van het experiment werden lineaire convergentietempi gemeten van 5 à 6 ‰ per jaar in de verwarmde delen van het experiment en tussen 3 ‰ (horizontaal) en 5 ‰ per jaar (verticaal) in de niet-verwarmde delen. Daarmee nam in de looptijd van het experiment de gemiddelde porositeit af van de initiële waarden van rond 36% tot 23% in de verwarmde delen van het experiment en tot 30% in de niet-verwarmde delen. De galerijconvergentie was relevant kleiner dan vooraf verwacht, een verschil dat ook na de aanpassingen van de modelparameters op basis van het laboratoriumonderzoek in het BAMBUS project bleef bestaan. Een mogelijke verklaring wordt gezocht in het essentieel driedimensionale karakter van de effecten van het experiment, dat slechts met quasi-driedimensionale modellen (temperatuurveld driedimensionaal, spanningen en verplaatsingen tweedimensionaal) kon worden doorgerekend.

- *Drukontwikkeling in de zoutgruis navulling stabiel*

Tijdens de loop van het experiment nam de druk in de zoutgruis navulling continu toe. Aan het eind van het experiment werd een maximale druk van 3.7 MPa gemeten in de verwarmde delen van het experiment en 0.28 MPa in de niet-verwarmde delen. De druk in het zoutgruis aan de galerijvloer was lager dan boven in de galerijen, welk effect nog nadere studie vereist.

- *Spanningen in het steenzout stabiel*

De toename van de spanningen in het omringende steenzout zijn sterk afhankelijk van de plaats en de richting. De hoogste spanningstoenames vonden plaats in de galerijwanden, de kleinste net boven de galerijen. De spanningen in de galerijwanden namen vrij snel na het aanleggen van de galerijen toe als gevolg van spanningsherverdeling door kruip van het steenzout. Na opstarten van het experiment werd opnieuw een sterke toename van de spanningen gezien die, na het bereiken van een maximum na enkele weken, in enkele jaren langzaam afnam tot waarden die iets lager lagen dan de gesteentedruk ter plaatse (ca. 12 MPa). Op grotere afstand ten noorden en zuiden van het experiment namen de gesteentespanningen meer continu toe na het opstarten van het experiment, maar ook die bereikten na enkele jaren constante waarden in de orde van de gesteentedruk.

- *Gasontwikkeling in de galerijen stabiel*

Onmiddellijk na het opstarten van het experiment werden relevante hoeveelheden waterstof, methaan en koolzuur gevormd. De toename van waterstof wordt gezien als het gevolg van de toename van de containercorrosie bij verhoogde temperatuur. Door de toename van de temperatuur in de zoutgruis navulling werd het daaraan gebonden methaan vrijgezet. Het koolzuur komt vrij uit de zoutkristalmatrix maar ontstaat ook bij de oxidatie van waterstof-carbonaten. Aan het eind van het experiment had de gasproductie een constant niveau bereikt.

Een gedetailleerde beschrijving van het TSDE experiment en de resultaten ervan zijn te vinden in paragraaf 2.2 van het eindrapport van het BAMBUS project [1].

### 2.1.2 DEBORA-1 experiment

Het DEBORA-1 experiment had tot doel de ontwikkeling van de zoutgruis navulling rond HLW-vaten in een boorgat na te bootsen. Dit experiment bestond in essentie uit een starre verwarmde buis met de doorsnede van een HLW-vat omringt door een 90 mm dikke zoutgruis navulling in een boorgat met dezelfde doorsnede als voorzien in het boorgatopslag concept. De belangrijkste resultaten waren:

- *Temperatuurontwikkeling in de zoutgruis navulling*

Tijdens de eerste maanden van het experiment liepen de temperaturen in het zoutgruis snel op tot rond 185 °C, waarna de temperatuur nog slechts weinig steeg tot zo'n 190 °C aan het eind van het experiment, iets lager dan vooraf verwacht. Een verklaring hiervoor wordt gezocht in het warmtetransport via de afstandopnemers en convectief warmtetransport tussen de buis en de heaters welke effecten niet in de modelberekeningen waren meegenomen.

- *Spanningsopbouw in de zoutgruis navulling*

De gemeten radiale spanning in de met zoutgruis nagevulde annulus liep in de eerste vier maanden op tot rond 7 MPa, hetgeen op basis van nakalibratie correspondeert met zo'n 14 MPa (zie § 3.1.5), ongeveer 4 MPa lager dan de door GRS voorspelde waarde. Na deze periode bleef de radiale spanning redelijk constant.

- *Porositeit van de zoutgruis navulling*

In de eerste vier maanden van het experiment nam de dikte van de zoutgruisring af met meer dan 20 mm, waarna de dikte nog maar weinig verder afnam tot dikten tussen de 65 mm en 69 mm. Daarmee samenhangend nam de porositeit af van de initiële waarde van rond 38% tot rond 9%.

- *Doorlaatbaarheid van de zoutgruis navulling*

Nadat na 2 maanden de porositeit was afgenomen tot onder de 25%, werd met behulp van stikstofstroom metingen regelmatig de doorlaatbaarheid van de zoutgruis navulling bepaald. Deze nam in de loop van het experiment af van  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  in april 1997 tot ongeveer  $7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  in januari 1998. Via inverse modellering van de gemeten ontwikkeling van de gasstroom kon de gemiddelde porositeit worden geschat: dit leidde tot waarden voor de porositeit die consistent waren met die welke bepaald waren uit het verloop van de afstandopnemers.

- *Corrosie van materiaalmonsters*

De buis in het DEBORA-1 experiment was voorzien van een aantal materiaalmonsters om de corrosie onder opslagomstandigheden te onderzoeken. Onderzoek na ontmanteling van het DEBORA-1 experiment bevestigde eerdere laboratoriumexperimenten voor deze materialen.

Details van het DEBORA-1 experiment zijn te vinden in paragraaf 2.3.1 van het eindrapport van het BAMBUS project [1]. Een toelichting op de NRG bijdrage staat in hoofdstuk 3 van dit rapport.

### 2.1.3 DEBORA-2 experiment

Het DEBORA-2 experiment had tot doel de ontwikkeling van de zoutgruis afsluiting van HLW opslagboorgat na te bootsen. Dit experiment bestond in essentie uit een boorgat met dezelfde doorsnede als voorzien in het boorgatopslag concept nagevuld met zoutgruis, omringt door vier externe heaters om het convergentieproces te versnellen. De belangrijkste resultaten waren:

- *Temperatuurontwikkeling in de zoutgruis navulling*

Tijdens de eerste drie maanden nam de temperatuur in het zoutgruis snel toe tot rond 125 °C waarna deze nog maar langzaam steeg tot rond 135 °C tegen het eind van het experiment. Deze ontwikkeling kwam goed overeen met de verwachtingen.

- *Porositeit van de zoutgruis navulling*

De straal van het boorgat nam tijdens het experiment af van initieel 300 mm tot rond 260 mm, corresponderend met een afname van de porositeit van de initiële waarde van 37% tot ongeveer 12%.

- *Spanningsopbouw in de zoutgruis navulling*

De gemeten radiële spanning in de zoutgruis navulling liep in de eerste maanden op tot rond 8 MPa, hetgeen op basis van nakalibratie correpondeert met zo'n 16 MPa (zie paragraaf 3.1.5), slechts iets lager dan de door GRS voorspelde waarde. Na maart 1999 werden, na een korte temperatuurs- en spanningsverhoging tengevolge van een onbedoelde verhoging van het heater-vermogen, nog slechts dalende spanningen geregistreerd. Mogelijk is het directe contact tussen het stijf geworden zoutgruis en de opnemers verloren gegaan door het krimpen van het zoutgruis bij de toen afnemende temperatuur door het terugregelen van het heater-vermogen.

- *Doorlaatbaarheid van de zoutgruis navulling*

Ook in dit experiment werd met behulp van stikstofstroom metingen regelmatig de doorlaatbaarheid van de zoutgruis navulling bepaald. Deze nam in de loop van het experiment af van  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  in oktober 1997 tot ongeveer  $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  in december 1998.

Details van het DEBORA-2 experiment zijn te vinden in paragraaf 2.3.2 van het eindrapport van het BAMBUS project [1]. Een toelichting op de NRG bijdrage is te vinden in hoofdstuk 3 van dit rapport.

#### 2.1.4 *Vrije-convergentie boorgatexperiment*

Het vrije-convergentie boorgatexperiment had tot doel in-situ het verband tussen de gesteentedruk en de boorgatconvergentie te bepalen en daarmee de lokale afwijking van de gesteentedruk ten opzichte van de lithostatische druk vast te stellen. Het experiment bestond in essentie uit een drooggeboord 500 m diep boorgat met daarin op vier diepten meetapparatuur om de temperatuur en de diameter van het boorgat te bepalen. De belangrijkste resultaten waren:

- *Temperatuur als functie van de diepte*

De gemeten (lucht)temperatuur op de verschillende diepten bleef gedurende de looptijd van het experiment stabiel met een gemeten temperatuursgradiënt van 1.25 °C per 100 m. Onder in het boorgat bedroeg de temperatuur 45 °C.

- *Convergentie als functie van de diepte*

Zoals verwacht nam het convergentietempo van het boorgat toe met meetdiepte en was dit tempo als functie van de tijd tamelijk constant met een slechts lichte afname. Onder in het boorgat nam de boorgatdiameter over de looptijd van het experiment af van de initiële 600 mm tot 460 mm, de diameterafname bij het hoogste meetpunt in het boorgat bedroeg slechts 10 mm.

Details van het 500-m vrije-convergentie boorgatexperiment zijn te vinden in paragraaf 2.4 van het eindrapport van het BAMBUS project [1]. Een toelichting op de NRG bijdrage is te vinden in hoofdstuk 3 van dit rapport.

## 2.2 Laboratorium onderzoek

### 2.2.1 Zoutgruis compactietests

In de laboratoria van de vier deelnemende partners – BGR, FZK/INE, GRS en G.3S – werden een groot aantal compactietests uitgevoerd bij gegeven (hydrostatische en deviatorische) belastingen om de afhankelijkheid van het compactietempo van zoutgruis van de beginporositeit, de korrelgrootte-verdeling, de temperatuur en de mate van consolidatie vast te stellen van. Andersom werd ook bij voorgeschreven convergentietempo de invloed op de deviatorische spanningsopbouw in zoutgruis van de beginporositeit, de korrelgrootte-verdeling en de temperatuur onderzocht.

Met de resultaten van de uitgevoerde zoutgruis compactietests zijn parameterwaarden bepaald voor verschillende beschrijvingen van het constitutief gedrag van zoutgruis, waarvoor zij verwezen naar paragraaf 4.3.2 van het eindrapport van het BAMBUS project [1]. Deze modellen hebben gemeen dat ze de compactie van het zoutgruis beschrijven:

- als een irreversibele rek beschreven met een viscoplastisch voorschrift
- als een functie van de hydrostatische en deviatorische spanningen
- met de viscoplastische reksnelheid normaal aan een viscoplastisch criterium (vaak kwadratisch in de hydrostatische en deviatorische spanningen)
- met een temperatuursafhankelijkheid beschreven volgens een Arrheniuswet (i.e.  $\sim e^{-Q/RT}$ )
- als een functie van de consolidatie en de momentane staat, tenderend naar het gedrag van massief steenzout bij afnemende porositeit

De modellen verschillen vooral in de aangenomen vorm van de boven aangegeven functies.

Details betreffende de laboratoriumtests voor de bepaling van de compactie-eigenschappen van zoutgruis zijn te vinden in paragraaf 3.4.1 van het eindrapport van het BAMBUS project [1].

### 2.2.2 Zoutgruis doorlaatbaarheidstests

Zowel door GRS als door G.3S zijn een groot aantal doorlaatbaarheidstests aan zoutgruis uitgevoerd, met verschillende korrelgrootte-verdelingen, temperaturen en compactieverlopen (hydrostatische en deviatorische belasting, diverse belastingscycli, enzovoorts). De resultaten van deze tests lieten zien dat de doorlaatbaarheid van zoutgruis voornamelijk wordt bepaald door de porositeit; variatie in de voorgeschiedenis en de meetcondities lieten geen duidelijke systematische invloed zien. Voor waarden van de porositeit groter dan 1.5% wordt binnen een factor 3 nauwkeurig de doorlaatbaarheid van zoutgruis beschreven door de relatie:

- Doorlaatbaarheid:  $k = 1.559 \cdot 10^{-8} \varphi^{5.24}$  [m<sup>2</sup>]

Details betreffende de laboratoriumtests voor de bepaling van de doorlaatbaarheid van zoutgruis zijn te vinden in paragraaf 3.4.3 van het eindrapport van het BAMBUS project [1].

### 2.2.3 Thermische eigenschappen van zoutgruis

De Franse partner G.3S heeft een groot aantal laboratoriumtests uitgevoerd om de thermische eigenschappen van zoutgruis als functie van de porositeit en hun onderlinge verbanden vast te stellen. Het bleek dat voor waarden van de porositeit kleiner dan 30% de meetgegevens goed werden benaderd door lineaire functies van de porositeit  $\varphi$ . De benaderingen voor de metingen bij kamertemperatuur waren:

- Thermische geleidbaarheid:  $\lambda = 5.08 - 13.8 \varphi$  [W/m·K]
- Thermische diffusiecoëfficiënt:  $k = 2.88 \cdot 10^{-6} - 6.82 \cdot 10^{-6} \varphi$  [m<sup>2</sup>/s]
- Volumieke warmtecapaciteit:  $\rho C = 1.93 \cdot 10^6 - 2.04 \cdot 10^6 \varphi$  [J/m<sup>3</sup>·K]
- Massieke warmtecapaciteit:  $C = 875$  [J/kg·K]

Op basis van geometrische argumenten (relatief zoutvolume en relatieve oppervlakte van contactvlakken tussen zoutkorrels) wordt een verband tussen de thermische geleiding en de porositeit verwacht van de vorm  $\lambda \sim (1 - \varphi)^4$ . Gebruikmakend van de bekende thermische eigenschappen van massief steenzout en het verband tussen thermische geleidbaarheid en volumieke warmtecapaciteit,  $k = \lambda / \rho C$ , zijn de volgende verbanden te leggen (zie [1], paragraaf 5.3.3.1, NRG modellering):

- Thermische geleidbaarheid:  $\lambda = \lambda_{\text{zout}}(T) \cdot (1 - \varphi)^4$  [W/m·K]
- Thermische diffusiecoëfficiënt:  $k = k_{\text{zout}}(T) \cdot (1 - \varphi)^3$  [m<sup>2</sup>/s]
- Volumieke warmtecapaciteit:  $\rho C = \rho_{\text{zout}}(T) \cdot C_{\text{zout}}(T) \cdot (1 - \varphi)$  [J/m<sup>3</sup>·K]
- Massieke warmtecapaciteit:  $C = C_{\text{zout}}(T)$  [J/kg·K]

waarin het subscript 'zout' verwijst naar de betreffende eigenschap voor massief steenzout:

- Thermische geleidbaarheid:  
 $\lambda_{\text{zout}}(T) = 13.196 - 3.7384 \cdot 10^{-2} T + 4.0974 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.51 \cdot 10^{-8} T^3$  [W/m·K]
- Massieke warmtecapaciteit:  $C_{\text{zout}}(T) = 806.856 + 0.177284 T$  [J/kg·K]
- Specifieke massa:  $\rho_{\text{zout}}(T) = 2160 - 0.09 T$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Thermische diffusiecoëfficiënt:  $k_{\text{zout}}(T) = \lambda_{\text{zout}}(T) / (\rho_{\text{zout}}(T) \cdot C_{\text{zout}}(T))$  [m<sup>2</sup>/s]

en de temperaturen T zijn aangegeven in kelvin [K]. Toepassing van deze verbanden voor de door G.3S gebruikte testcondities leidt tot waarden voor de thermische eigenschappen van zoutgruis die ruim binnen het bereik van de meetwaarden liggen.

Details betreffende de laboratoriumtests voor de bepaling van de thermische eigenschappen van zoutgruis zijn te vinden in paragraaf 3.4.2 van het eindrapport van het BAMBUS project [1].

## 2.3 Model benchmark

De model benchmark "Comparative Study on Crushed Salt (CS)<sup>2</sup>" was opgebouwd uit drie opeenvolgende fasen met toenemende complexiteit. De ontwikkeling van het NRG-model voor het constitutieve gedrag van zoutgruis dat in deze model benchmark is gebruikt is beschreven in hoofdstuk 4 van dit rapport.



### 2.3.1 Fase I: modelberekeningen aan simpele hypothetische problemen

In deze fase van de benchmark werden twee problemen gemodelleerd:

1. Het eerste probleem betrof een zoutgruis oedometer test bij een temperatuur van 100 °C bij voorgeschreven reknelheid, waarbij de spanningsopbouw in het zoutgruis moest worden berekend. Hierbij werd uitgegaan van modelparameters gefit aan de axiaalspanningen gemeten bij BGR oedometer tests (zie [1], figuur 3.2a,b) en het verloop van de verhouding tussen radiaal- en axiaalspanningen gebaseerd op FZK tri-axiaalcel tests (zie [1], tabel 4.2).

Hoewel de axiaalspanningen over het algemeen door alle modellen redelijk werden gereproduceerd, lagen de berekende radiaalspanningen verder uiteen.

2. Het tweede probleem betrof de berekening van de convergentie van een oneindig lang met zoutgruis nagevuld boorgat omringd door steenzout onder 20 MPa gesteentedruk bij een temperatuur van 200 °C. Hierbij werd opnieuw uitgegaan van de bovenbeschreven modelparameters.

Voor dit probleem weken de berekende radiaalspanningen in het zoutgruis weinig uiteen, terwijl nu de axiaalspanningen een veel grotere spreiding toonden.

### 2.3.2 Fase II: modelberekeningen aan laboratoriumtests

Ook in deze fase werden twee problemen gemodelleerd:

1. Het eerste probleem betrof een tri-axiaal laboratoriumtest, die parallel ook daadwerkelijk door 3 laboratoria werd uitgevoerd. Deze test bestond uit een hydrostatische compactietest waarbij zoutgruis werd onderworpen aan een voorgeschreven verloop van 3 belastings/ontlastings cycli (5/4.25, 10/8.5 en 15/12.75 MPa) over een tijdspanne van 45 dagen. Hiervoor werd het verloop van de porositeit berekend zowel met de hiervoor beschreven modelparameter set als met een parameter set die gefit was aan meetdata van FZK (zie [1], tabel 3.4a,b).

Het berekende verloop van de porositeit in de tijd lag bij alle modellen en met beide modelparameter sets binnen de bandbreedte van het in de laboratoria gemeten verloop. Opvallend was dat de verschillen in feite werden bepaald door de reactie op de *eerste* belastingsstap bij hoge porositeit, waarvoor alle modellen moeten extrapoleren bij gebrek aan meetwaarden.

2. Het tweede probleem betrof de berekening van de porositeit, de spanningen en opwarming vanaf een initiële temperatuur van 20 °C van een oneindig lang met zoutgruis nagevulde holle cilinder rond een heater met een vaste temperatuur van 200 °C. Aan de buitenzijde was het zoutgruis omringd door steenzout bij een gesteentedruk van 10 MPa. De berekeningen werden uitgevoerd met beide hiervoor genoemde modelparameter sets.

De temperatuurontwikkeling werd met alle modellen op vergelijkbare wijze berekend; de temperaturen lagen steeds binnen een nauwe band met een maximum afwijking van 20°C op 1000 dagen vlak bij de boorgatwand.

Evenals voor het eerdere boorgat convergentieprobleem lagen de berekende radiaalspanningen voor alle modellen redelijk bijeen, terwijl de axiaal- en omtrekspanningen een grotere spreiding vertoonden; de spreiding voor de 'BRG-parameterset' was daarbij groter dan voor de 'FZK-set'. De berekende ontwikkeling van de porositeit bleek sterk afhankelijk van de gebruikte modelparameter set: voor de 'BGR-set' was de porositeit na 100 jaar afgenomen tot 2 à 4%, terwijl voor de 'FZK-set' voor dat tijdstip waarden rond 1 ‰ werden gevonden.

### 2.3.3 Fase III: modelberekeningen aan het TSDE experiment

Ook in deze fase werden twee problemen gemodelleerd:

1. Het eerste probleem was een modelberekening van een van het TSDE experiment afgeleide configuratie: alleen de eindige lengte van het experiment werd vervangen door een oneindige herhaling, waardoor een tweedimensionale configuratie ontstond. Voor dit probleem moesten de ontwikkeling van de temperatuur, spanningen en vervormingen over een horizontale en een verticale dwarsdoorsnede worden bepaald gebruikmakend van de parameterset gefit aan FZK meetdata.

In het algemeen lagen de resultaten van de deelnemers binnen een smalle band. De verschillen waren vooral toe te schrijven aan de verschillen in de roosterdichtheid en soms ook de post-processing. Het verschil met de in het TSDE experiment gemeten waarden was groot, wat geheel wordt toegeschreven aan het reëel driedimensionaal gedrag van het TSDE experiment waarbij relevant warmtetransport in de lengterichting niet verwaarloosd kan worden zoals in het model was aangenomen.

2. Om de effecten van de verschillende formuleringen van het constitutief gedrag van zoutgruis goed te kunnen vergelijken, werd besloten voor alle modellen de reksnelheid als functie van temperatuur, consolidatie en hydrostatische en deviatorische spanning te bepalen voor een range van combinaties van omstandigheden. Hierbij moest uitgegaan worden van de parameterset gefit aan FZK meetdata.

De logaritmische standaarddeviatie van de modelfits ten opzichte van de FZK meetresultaten liepen voor de verschillende modellen uiteen van 0.57 (GRS/DBE) tot 0.75 (ENRESA/CIMNE) met een gemiddelde van 0.65 (NRG). Dit betekent dat de *gemiddelde* afwijking tussen een modeluitkomst en een meetwaarde ongeveer een factor 2 bedroeg. De bandbreedte van de reksnelheden bepaald met de verschillende modellen bedroeg ongeveer een factor 5 à 10 binnen het datagebied en liep op tot maximaal ongeveer een factor 20 daarbuiten.

## 2.4 Thermomechanische berekeningen

In dit werkpakket hadden verschillende partners hun berekeningen aan de in het BAMBUS project uitgevoerde in-situ experimenten ingebracht:

- FZK-INE driedimensionale thermische en tweedimensionale thermomechanische analyse van het TSDE experiment;
- ENRESA/CIMNE gekoppelde tweedimensionale thermomechanische analyse van het TSDE experiment;
- GRS gekoppelde tweedimensionale thermomechanische analyses van de DEBORA-1 en DEBORA-2 experimenten;
- UPC gekoppelde tweedimensionale thermomechanische analyses van de DEBORA-1 en DEBORA-2 experimenten;
- NRG gekoppelde tweedimensionale thermomechanische analyses van de DEBORA-1 en DEBORA-2 experimenten;  
gekoppelde driedimensionale thermomechanische analyse van het DEBORA-2 experiment;  
tweedimensionale thermomechanische analyse aan het 500m vrije-convergentie experiment.

### 2.4.1 Thermomechanische analyses aan het TSDE experiment door FZK/INE

FZK/INE heeft een driedimensionale temperatuurberekening uitgevoerd aan het TSDE experiment. Met de uitkomsten hiervan zijn – onder aanname van een vlakke spanningstoestand – de spanningen en vervormingen berekend in twee dwarsdoorsneden van het experiment, een in het verhitte deel van het experiment en een op ongeveer 12 m van de heaters. Bij de thermomechanische berekeningen zijn twee varianten onderzocht die zich onderscheiden in de veronderstelde lithostatische druk: respectievelijk 15 MPa en 13 MPa. Het constitutief gedrag van zoutgruis in het experiment werd beschreven met een *hydrostatisch* model (zie [1], tabel 5.3).

De berekende temperaturen kwamen goed overeen met de meetresultaten in het TSDE experiment. Ook de convergentie van de galerij in het ‘koele’ deel van het experiment kon goed worden gereproduceerd: een lithostatische druk van 15 MPa gaf een lichte overschatting, een druk van 13 MPa echter weer een lichte onderschatting van de convergentie. De convergentie in het ‘hete’ deel van het experiment werd echter belangrijk overschat bij elk van de aangenomen waarden van de lithostatische druk. Een verklaring hiervan wordt gezocht in het gebruik van de aangenomen vlakke-spanningstoestand die de axiale vervormingen te zeer beperken waardoor een overschatting plaatsvindt van de convergentie in het ‘hete’ deel van het experiment.

Als variant op bovenstaande berekening werd voor een lithostatische druk van 13 MPa de analyse herhaald met een *deviatorisch* model voor het constitutief gedrag van zoutgruis (zie [1], tabel 5.3). Dit model vertoont een minder stijf gedrag van zoutgruis, wat aan de ene kant leidt tot lagere spanningen in het zoutgruis, maar aan de andere kant daardoor grotere convergentie van de galerij

toelaat. Het gemeten spanningsverloop in het zoutgruis komt (toevalligerwijs?) redelijk overeen met het spanningsverloop zoals dat met het *deviatorisch* model berekend is.

#### 2.4.2 *Thermomechanische analyses aan het TSDE experiment door ENRESA/CIMNE*

ENRESA/CIMNE heeft een volledig gekoppelde tweedimensionale analyse van het TSDE experiment uitgevoerd. Overschatting van de temperatuur werd hierbij gecompenseerd door verwaarlozing van de temperatuursafhankelijkheid van de thermische geleidbaarheid, zodat het berekende temperatuursverloop redelijk overeenstemde met het gemeten temperatuursverloop. Bij de berekeningen van ENRESA/CIMNE werd uitgegaan van een lithostatische druk van 10 MPa, hetgeen tot een goed overeenkomst leidde van het convergentieverloop tussen metingen en berekening. De overeenkomsten tussen het berekende en gemeten spanningsverloop waren minder goed: het gemeten zoutgedrag is stijver dan het gemodelleerde gedrag van zoutgruis.

#### 2.4.3 *Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door GRS*

GRS heeft een aantal volledig gekoppelde tweedimensionale analyses uitgevoerd voor de beide DEBORA experimenten. Daarbij maakte ze gebruik van twee parameter sets voor hun model voor het constitutief gedrag van zoutgruis, de originele set van Hein (zie [1], tabellen 5.6 en 5.7) en een eigen set op basis van in het BAMBUS project uitgevoerde metingen (zie [1], paragraaf 3.4.1). Het verschil in gedrag van beide sets uit zich in een wat stijver zoutgruis gedrag bij hoge porositeit (> 15%) en een licht minder stijf gedrag bij lagere porositeit. Omdat dit zich niet direct vertaalt in een omgekeerd gedrag in de berekende radiale spanningen, is er ook een relevant verschil in de deviatorische koppeling naar de axiale spanning. Voor beide experimenten weken de convergentie en spanningen in het zoutgruis berekend met beide parametersets week echter niet veel uiteen. Ook de met beide parametersets berekende temperatuurverlopen waren vrijwel gelijk.

Wanneer de berekende resultaten vergeleken worden met de gemeten waarden, dan blijkt de gemeten temperatuur bij het DEBORA-1 experiment relevant achter te blijven bij de verwachtingen. Ook het verloop van de gemeten convergentie wijkt voor waarden van de porositeit groter dan 30% relevant af van de berekeningen: het gemeten convergentietempo is ongeveer een factor twee kleiner dan verwacht. Ook het verloop van de gemeten radiale spanningen wijkt sterk af van de berekeningen, met name weer voor waarden van de porositeit groter dan 15%. Omdat het waargenomen lagere convergentietempo zich niet vertaalt in hogere waargenomen radiale spanning, moet het verschil gezocht worden in een ander dan berekend verloop van de vervorming van het omringende *steenzout*; deze zou veroorzaakt kunnen zijn door de invloed van de (niet-axisymmetrische) galerij boven het experiment, of door een afwijkende gesteentedruk ter plaatse veroorzaakt door vroegere uitgravingen en experimenten.

Het gemeten temperatuurverloop bij het DEBORA-2 experiment kwam wel goed overeen met de berekeningen, echter ook bij dit experiment deed zich hetzelfde verschil voor tussen metingen en berekeningen van het convergentietempo voor waarden van de porositeit groter dan 15%. De ontwikkeling van de radiale spanning – althans na correctie van de meetwaarden (zie paragraaf

3.1.5) – kwam wel redelijk overeen met de berekende waarden, wat wijst op een wat stijver gedrag van het zoutgruis dan beide door GRS gebruikte parametersets simuleren.

#### *2.4.4 Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door UPC*

Ook UPC heeft een aantal volledig gekoppelde tweedimensionale thermomechanische analyses uitgevoerd voor beide DEBORA experimenten. Daarbij werd steeds uitgegaan van een effectieve lithostatische druk van 9 MPa. Voor het DEBORA-1 experiment werden twee berekeningen uitgevoerd: een met de nominale warmte-input van 9 kW, en een met een aangepaste warmte-input van 7.5 kW ter verdiscontering van convectief warmtetransport door lucht tussen de heater en de verbuizing van het experiment. De door UPC gebruikte beschrijving van het constitutief gedrag van steenzout en zoutgruis is te vinden in [1], tabellen 5.8 en 5.9.

De voor een warmte-input van 7.5 kW berekende verlopen van temperatuur, convergentie en radiale spanningen voor het DEBORA-1 experiment laten zich goed vergelijken met de meetwaarden: de temperaturen worden licht onderschat, de convergentie wordt licht overschat – met name voor waarden van de porositeit kleiner dan 15% – en de radiale spanningen licht onderschat. De berekende waarden voor een warmte-input van 9 kW zijn – voor waarden van de porositeit groter dan 15% – vergelijkbaar met die van de GRS; voor lage waarden van de porositeit vertoont het aangenomen constitutief gedrag van zoutgruis een te weinig stijf gedrag resulterend in een veel grotere dan waargenomen eind-compactie van het zoutgruis.

De berekende resultaten voor het DEBORA-2 experiment vertonen grote overeenkomst met die van de GRS. Het temperatuursverloop komt goed overeen met de gemeten waarden, maar het convergentietempo is ongeveer een factor 2 hoger dan waargenomen, die bovendien ook blijft bestaan voor waarden van de porositeit lager dan 15%. De berekende radiale spanningen zijn lager dan de – gecorrigeerde – meetwaarden in het DEBORA-2 experiment wat ook duidt op een te weinig stijf gedrag bij lage porositeit in het gebruikte UPC model voor het constitutief gedrag van zoutgruis. Mogelijk houdt dit verband met het voor dit experiment gebruikte nogal grove zoutgruis dat afwijkt van het gebruikte zoutgruis bij de bepaling van de door UPC gebruikte parameterset.

#### *2.4.5 Thermomechanische analyses aan de DEBORA experimenten door NRG*

Ook NRG heeft een aantal volledig gekoppelde thermomechanische analyses uitgevoerd voor beide DEBORA experimenten. Hierbij werd steeds uitgegaan van een lithostatische druk van 9 MPa. Voor het DEBORA-1 experiment werd evenals in de hiervoor beschreven UPC analyses uitgegaan van een met 25% gereduceerde warmte-input ter verdiscontering van convectief warmtetransport door lucht tussen de heater en de verbuizing van het experiment. De door NRG gebruikte beschrijving van het constitutief gedrag van steenzout en zoutgruis is te vinden in [1], boven en in tabel 5.11.

Voor het DEBORA-1 experiment werd een tweedimensionale analyse uitgevoerd. Het berekende temperatuursverloop laat zich goed vergelijken met de meetwaarden. Ook de ontwikkeling van de

convergentie kwam goed overeen. De berekende spanningen waren echter een factor 2 kleiner dan de – met een factor 2 gecorrigeerde – meetwaarden.

Voor het DEBORA-2 experiment werden zowel een tweedimensionale analyse uitgevoerd als een driedimensionale; in die analyse werden de discrete perifere heaters expliciet gemodelleerd. De resultaten van beide analyses liepen niet ver uiteen. Opnieuw werd het temperatuurverloop goed voorspeld. Het berekende convergentietempo was echter een factor 2 hoger dan werd waargenomen: de daarmee verbonden porositeit bereikte dan ook veel lager waarden tegen het eind van het experiment dan werd waargenomen. De berekende radiale spanningen waren weer een factor 2 kleiner dan de – met een factor 2 gecorrigeerde – meetwaarden. Hieruit kan worden afgeleid dat het door NRG gebruikte model voor het constitutief gedrag van zoutgruis een minder stijf gedrag vertoont dan werd waargenomen. Mogelijk houdt dit verband met het voor dit experiment gebruikte nogal grove zoutgruis dat afwijkt van het gebruikte zoutgruis bij de bepaling van de door NRG gebruikte parameterset.

#### *2.4.6 Thermomechanische analyses aan het 500m vrije-convergentie experiment door NRG*

Met de in-situ meetresultaten op de bodem van het 500m vrije-convergentie experiment heeft NRG een parameterset (kruipcoëfficiënt  $A$  en spanningsexponent  $n$ ) bepaald voor een genormaliseerde Norton-wet voor het kruipgedrag van steenzout. Hierbij werd aangenomen dat de gesteentedruk onder in het boorgat ongestoord zou zijn door de vroegere uitgravingen en experimenten. Deze bepaling verliep in twee stappen:

- Eerst werd door gebruik te maken van zogenoemde genormaliseerde convergentiekrommen per spanningsexponent  $n$  de best fittende kruipcoëfficiënt  $A(n)$  bepaald.
- Vervolgens werd gekeken naar een minimum in de kwadratische afwijking tussen de metingen en de per set  $(A(n), n)$  bepaalde convergentiekrommen.

Hoewel de uitkomst niet geheel eenduidig was, onderbouwen de metingen het gebruik van een spanningsexponent  $n = 5$  vrij goed; deze waarde is gelijk aan de gebruikelijke waarde voor de spanningsexponent. De op basis van de lokaal gemeten temperatuur bepaalde bijbehorende kruipcoëfficiënt  $A = 7.4 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  is een factor 3.5 groter dan de gemiddelde op basis van metingen op het 800m niveau van de Assemijn bepaalde waarde van de kruipfactor  $A$ . Overigens bedraagt de range van kruipcoëfficiënten bepaald op basis van experimenten in de Assemijn ongeveer een factor 30.

Met behulp van de parameterset bepaald op de metingen onder in het boorgat is vervolgens op basis van de meetresultaten op minder grote diepte de gesteentedruk bepaald als functie van de diepte. Uitgaande van een ongestoorde gesteentedruk onder in het boorgat nam bij afnemende diepte de afwijking toe: op basis van de metingen in het 500m vrije-convergentie experiment – en de uitgevoerde metingen in een eerder 300m boorgat – tendeert de bepaalde gesteentedruk naar een waarde tussen de 10 en 12 MPa op het 800m niveau in de Assemijn.

### **3 In-situ experimenten**

In het kader van het BAMBUS project heeft NRG deelgenomen aan de in-situ experimenten DEBORA-1 en DEBORA-2. Daarnaast werd het eerder gestarte 500m vrije-convergentie experiment in het BAMBUS project afgerond. In dit hoofdstuk worden enkele aspecten van de NRG bijdragen aan de in-situ experimenten besproken die in het BAMBUS rapport ([1], hoofdstuk 2) wat onderbelicht zijn gebleven.

#### **3.1 DEBORA experimenten**

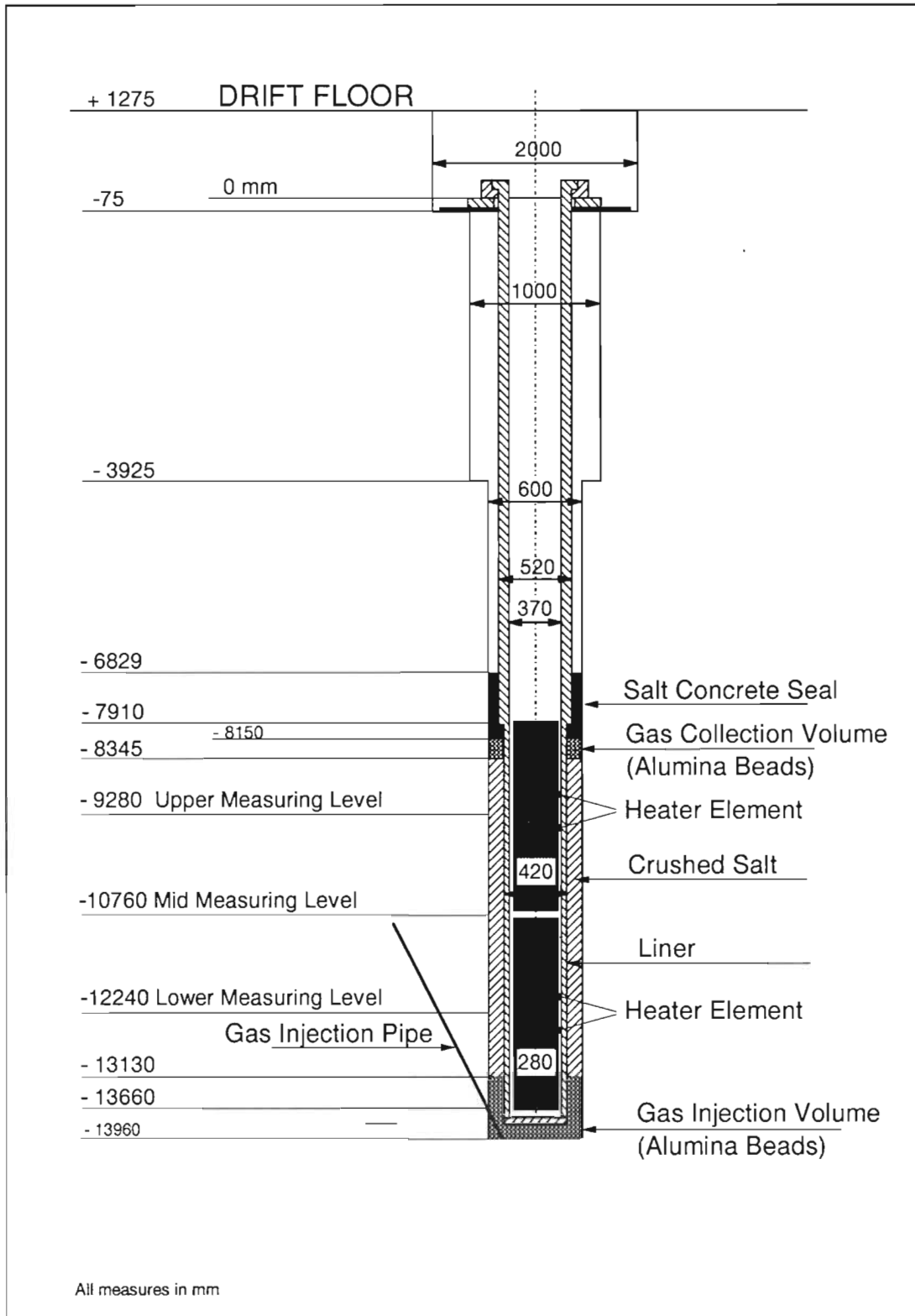
In het BAMBUS project werden twee experimenten uitgevoerd om het gedrag van zoutgruis voor toepassing in het boorgat opslagconcept te onderzoeken. In het DEBORA-1 experiment werd gekeken naar het gedrag van het relatief fijnkorrelig zoutgruis in de annulus tussen een warmteproducerend HLW container en boorgat, terwijl in het DEBORA-2 experiment het gedrag van het grovere zoutgruis in de isolerende boorgatafsluiting werd onderzocht. Beide experimenten werden uitgevoerd in het voormalige HLW onderzoeksveld op het 800m niveau in de Assemijn.

De belangrijkste bijdragen van NRG aan deze experimenten bestond uit assistentie bij het ontwerp van de experimenten, fabricage van meetinstrumenten en – wat betreft het DEBORA-2 experiment – plaatsen van het meetframe. In de volgende paragrafen wordt kort het ontwerp van beide experimenten besproken, waarbij de nadruk ligt op de in opdracht van NRG door ECN-EE ontwikkelde en geleverde meetinstrumenten. Gedurende de loop van het DEBORA-1 experiment bleek dat het signaal van enkele meetinstrumenten niet meer direct interpreteerbaar was. Daarom is in paragraaf 3.1.3 beschreven welke acties zijn genomen om de oorzaken daarvan te achterhalen en tot welke maatregelen dit leidde om de waargenomen problemen in het toen half afgebouwde DEBORA-2 experiment te voorkomen. In paragraaf 3.1.4 is beschreven op welke wijze het convergentieverloop in het DEBORA-1 experiment door NRG werd gereconstrueerd op basis van herinterpretatie van de ruwe meetdata van de afstandopnemers. Paragraaf 3.1.5 tenslotte, geeft een beschrijving en waardering van de re-kalibratie van de DEBORA drukopnemers door GRS.

##### *3.1.1 Ontwerp DEBORA-1*

Het DEBORA-1 experiment had tot doel de condities in de met zoutgruis nagevulde annulus tussen warmteproducerend HLW container en boorgat in het boorgat opslagconcept na te bootsen. Daartoe werd gebruik gemaakt van een 15m diep boorgat met een diameter van 60 cm waarin een 42 cm diameter buis met heaters werd geplaatst ter modellering van de HLW containers. Op de buis waren op drie diepten opnemers geplaatst voor het meten van de breedte van de annulus, de temperatuur en de radiale spanning in het tussen de buis en de boorgatwand gestorte zoutgruis. Het onderste deel van het boorgat, evenals een volume boven het ingebrachte zoutgruis, was gevuld met keramische aluminium kogels; deze volumina dienden respectievelijk als gasinjectie volume en gasverzamel volume voor de permeabiliteitstests die tijdens het DEBORA-1 experiment werden uitgevoerd. In het gasinjectie volume en het gasverzamel volume waren temperatuurbestendige gasdrukmeters geplaatst om de drukgradiënt over het zoutgruisvolume vast

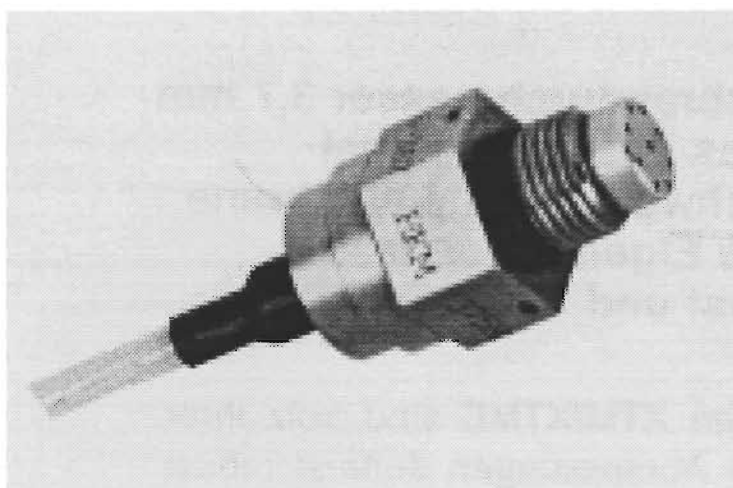
te stellen. Het totale testvolume werd afgesloten door een 1.3 m lange betonnen plug, boven het gas verzamelvolume. De opzet van het DEBORA-1 experiment is geschetst in figuur 1.



figuur 1 Opzet DEBORA-1 experiment

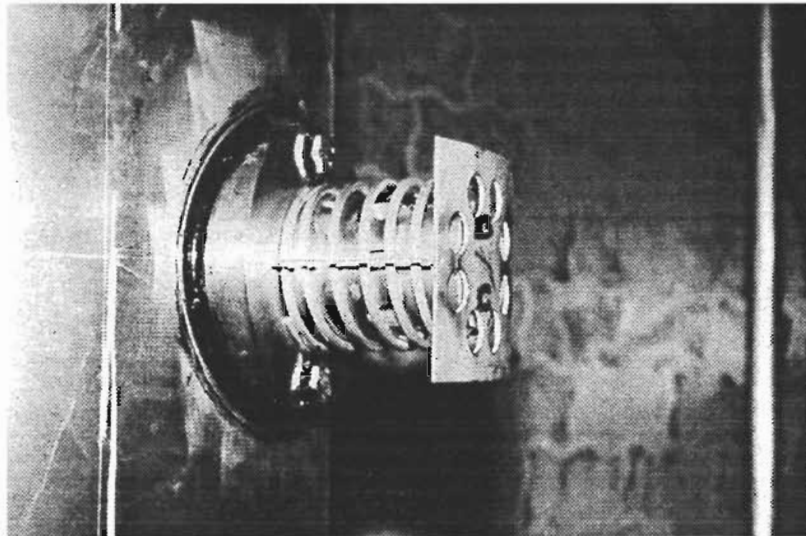


De druk/temperatuur opnemers (figuur 2) van het DEBORA-1 experiment waren geleverd door Kulite Benelux B.V. Zij bestonden uit een roestvast stalen membraam dat via zogeheten siliconenolie gekoppeld was aan een met weerstanden temperatuurgecorrigeerde omvormer, waar de door de druk veroorzaakte vervorming werd omgezet in een elektrisch signaal. Daarnaast werd een van de weerstanden van de omvormer gebruikt om een temperatuursignaal te genereren. De druksensor had een meetbereik van 0 tot 20 MPa met een nauwkeurigheid van 0.2 MPa, terwijl het bereik van de temperatuursensor 20 tot 200 °C bedroeg met een gemiddelde afwijking van minder dan 3 °C. De opnemers waren zodanig op de buis bevestigd dat het drukmembraam gericht was in radiale richting. Zowel de sensors als de verbindingkabels waren gekozen om bestand te zijn tegen de bij het experiment te verwachten temperaturen.



figuur 2 Druk en temperatuur opnemer (Kulite Benelux B.V.)

Omdat er geen voor het DEBORA-1 experiment geschikte afstandopnemers op de markt waren, zijn deze in het kader van het BAMBUS project speciaal hiervoor door ECN-EE ontwikkeld. De opnemers bestonden uit een vast op de buis gemonteerd cilindrisch deel, met een doorsnede van ongeveer 75 mm, waarin een beweegbaar deel kon glijden (figuur 3). Na plaatsing van de buis werden de beweegbare delen door veren tegen de boorgatwand geduwd. In elke opnemer bevond zich een aan het beweegbare deel bevestigde metalen plaat, waarin vijf rijen rechthoekige sleuven waren uitgespaard. Deze plaat gleed langs vijf contactpennen verbonden met het vaste deel van de opnemer die alleen op plaatsen waar geen sleuf was contact maakten. Samen vormden de vijf contactpennen een zogeheten gray-code (contact = 1; geen contact = 0), die de eigenschap heeft dat per verandering van positie slechts één contactwaarde verandert. Alle afstandopnemers waren gekalibreerd bij kamertemperatuur, één ook bij de maximum ontwerptemperatuur. Het meetbereik bedroeg 65 tot 97 mm met een nauwkeurigheid van 0.2 mm voor de omslagpunten, die een onderlinge afstand hadden van 1.25 mm. De maximale ontwerptemperatuur voor de afstandopnemers bedroeg 175 °C en de maximale ontwerpdruk 20 MPa.



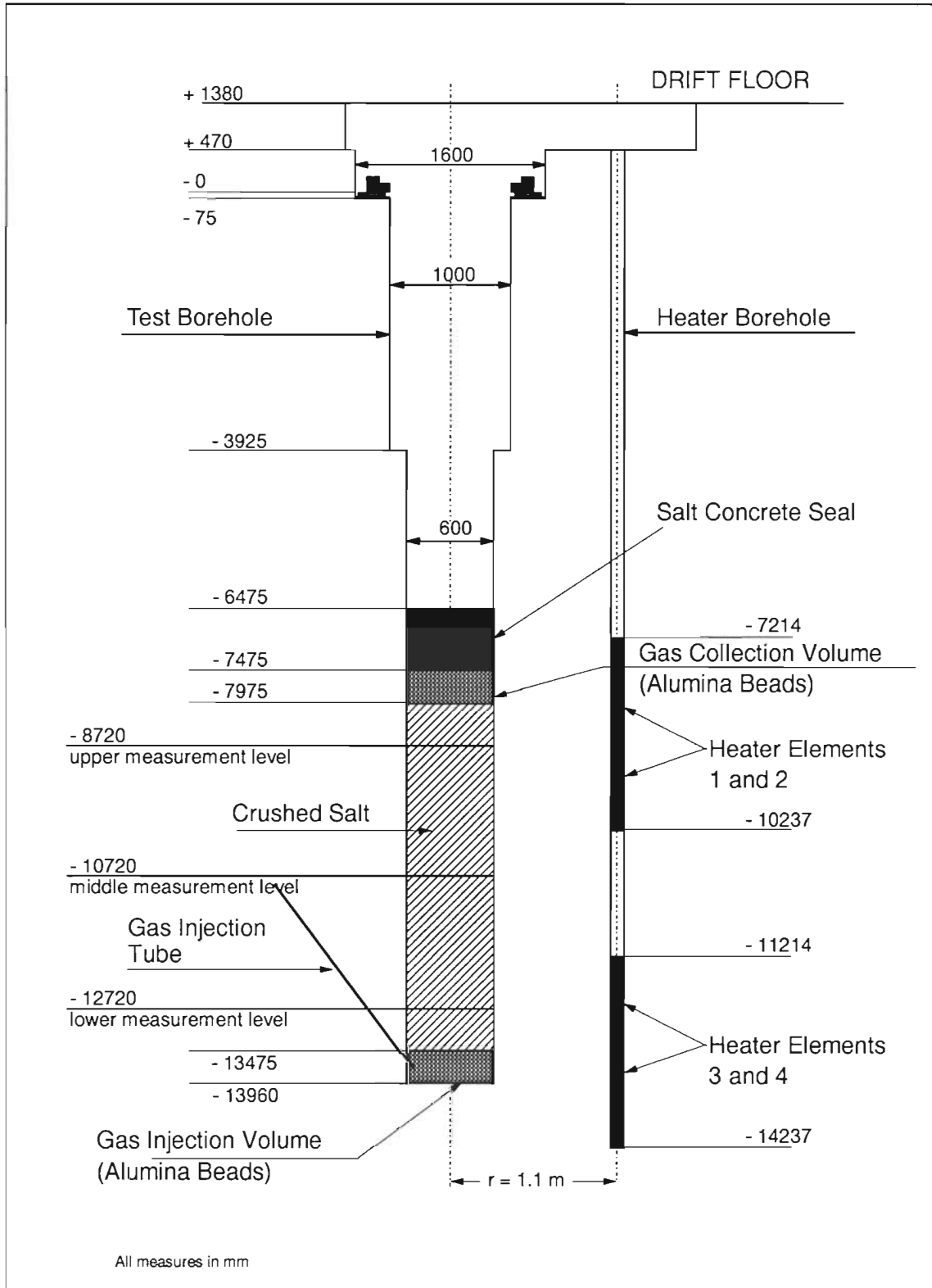
figuur 3 Afstandopnemer (ECN-EE)

### 3.1.2 Ontwerp DEBORA-2

In het DEBORA-2 experiment werd het gedrag van het wat grovere zoutgruis in een boorgat-afsluiting onderzocht. Ook dit experiment werd uitgevoerd in een 60 cm doorsnede en 15 m diep boorgat, op een afstand van ongeveer 15 van het DEBORA-1 experiment. Net als in dat experiment werd ook hier het onderste deel van het boorgat gevuld met keramische aluminium kogels, een gasinjectie volume voor de doorlaatbaarheidstests. Daarbovenop werd 5.5 m zoutgruis gestort, met daar bovenop weer keramische aluminium kogels, het gasverzamel volume. Het geheel werd afgesloten met zout-betonnen plug. Om de duur van het experiment te bekorten, werd ter hoogte van het zoutgruis het experiment verhit door vier perifere heaters – elk met een warmteproductie van 3.5 kW – op een afstand van ongeveer 1.1 m van het centrum van het boorgat. De opzet van het DEBORA-2 experiment is geschetst in figuur 4.

In het midden van het boorgat was een frame geplaatst met een doorsnede van 11.5 cm waarop, net als in het DEBORA-1 experiment, op drie meetniveaus druk- en temperatuuropnemers waren geplaatst en afstandopnemers om de convergentie van het boorgat te meten. Per meetniveau was één drukopnemer in axiale richting geplaatst en één in radiale richting. Zowel het frame, met daarop gemonteerde opnemers, en de vier heaters waren ontwikkeld, geleverd en ter plekke geassembleerd door ECN-EE.

De druk/temperatuuropnemers hadden dezelfde technische specificaties als in het DEBORA-1 experiment. Ook het ontwerp van de afstandopnemers was gebaseerd op de eerdere voor het DEBORA-1 experiment door ECN-EE ontwikkelde opnemers. Het meetbereik hiervan bedroeg 193 tot 253 mm met een nauwkeurigheid van 0.2 mm voor de omslagpunten, die voor het DEBORA-2 experiment een onderlinge afstand hadden van 1.875 mm. De maximale ontwerp-temperatuur voor de afstandopnemers bedroeg 200 °C en de maximale ontwerpdruk 20 MPa.



figuur 4 Opzet DEBORA-2 experiment

### 3.1.3 Meetproblemen DEBORA-1 experiment

Al korte tijd na het opstarten van het DEBORA-1 experiment bleek dat enkele opnemers moeilijk verklaarbare meetresultaten leverden:

- één van de zes afstandopnemers gaf een *toename* van de annulus-breedte aan in plaats van de verwachte afname door convergentie van het boorgat;
- van twee van de zes drukopnemers viel regelmatig het signaal weg;
- van één opnemer leek ook de temperatuuruitlesing onbetrouwbaar te zijn geworden.

In de maanden daarna nam het aantal opnemers dat geen of waarschijnlijk foutieve resultaten leverde nog toe. Zo nam in tegenstelling tot de verwachte spanningsopbouw in het zoutgruis de door de drukopnemers aangegeven radiale spanning in de eerste anderhalve maand nauwelijks toe. Omdat dezelfde soorten opnemers ook in het DEBORA-2 experiment zouden worden gebruikt, werd door ECN-EE dan ook al snel een onderzoek gestart naar de mogelijke oorzaken van de gevonden meetresultaten. Direct onderzoek naar de oorzaken kon slechts bestaan uit het ter plaatse doormeten van de signaaldraden van de opnemers, aangevuld met enkele aanwijzingen zoals de omstandigheden rond het begin van enkele meet-onregelmatigheden, en observaties bij de tijdens het DEBORA-1 experiment regelmatig uitgevoerde doorlaatbaarheidstests. Hieruit kwamen de volgende zaken naar voren:

- in de eerste maanden van het experiment kwamen bij de doorlaatbaarheidstest regelmatig onverwacht ruime hoeveelheden vocht mee met de door het zoutgruis geperste stikstof;
- bij het doormeten van de signaaldraden van de afstandopnemers, om te achterhalen wat de werkelijke stand van de opnemers is, werd waargenomen dat er zelfs spanningen stonden over losgehaalde draden, hetgeen op elektrolyse duidt;
- na een onderzoek waarbij het zoutvolume gedurende enkele uren met droge stikstof was gespoeld, bleken enkele afstandopnemers tijdelijk weer betrouwbare meetresultaten te geven;
- uitschieters in de metingen van de drukopnemers correleerden regelmatig – maar zeker niet altijd – met de uitval en het weer inschakelen van de heaters van het experiment;
- het wegvallen van het signaal van de drukopnemers ging regelmatig gepaard met een duidelijke transiënt in het temperatuursignaal.

Uit deze waarnemingen kwam bij de ontwikkelaars van de meetinstrumentatie het volgende beeld naar voren ter verklaring van de uitlezingen van respectievelijk de afstandopnemers en de druk-/temperatuuropnemers:

- Kennelijk bevatte het in het DEBORA-1 experiment gebruikte zoutgruis relatief veel vocht, dat bij de in het experiment heersende hoge temperaturen daaruit is vrijgekomen. Waarschijnlijk is dit zoutige vocht via de ontluchtingsgaatjes in de afstandopnemers doorgedrongen waar het, tijdens de herhaaldelijk opgetreden temperatuurdips ten gevolge van uitval van de heaters, op de contactpennen is gecondenseerd. Doordat voor de continue metingen gelijkspanning werd gebruikt, heeft elektrolyse het zoutige vocht ontleed en ter plekke de vaste – geleidende – stoffen op de contactpennen afgezet, waardoor de aan weerszijden van de codeplaat geplaatste contactpennen ook over gleuven in de codeplaat contact konden maken (valse 1 waarden).

- Omdat zoutgruis uit losse zoutschilfers bestaat, die relatief groot zijn in vergelijking met het contactoppervlak van de drukopnemers, kan het enige tijd duren voordat de uitlezing van een drukopnemer een correcte weergave van de gemiddelde spanning in het zoutgruis aangeeft, waarmee de bij de verwachtingen achterblijvende meetwaarden van de radiale spanningen kan worden verklaard. Het wegvallen van drukuitlezing van drukopnemers na uitval van heaters is waarschijnlijk het gevolg van contactverlies tussen de opnemer en het relatief stijve zoutgruis dat bij een afname van temperatuur krimpt. Na het opnieuw inschakelen van de heaters duurt het door de stijfheid van het zoutgruis dan weer enige tijd voordat dit contact volledig hersteld is. Het feit dat zoutgruis uit schilfers bestaat verklaart waarschijnlijk ook het na verloop van tijd uitvallen van de drukopnemers: de zoutschilfers hebben scherpe hoeken en randen die – ondanks de bescherming met een siliconen neusje – bij de ter plekke heersende drukken de drukmembranen – op den duur onherstelbaar – kunnen beschadigen. Een kleine beschadiging in een drukmembraam kan door de relatieve plasticiteit van steenzout opnieuw afgesloten worden, zodat een uitgevallen drukopnemer soms na verloop van tijd toch weer enige tijd een ‘zinvol’ signaal kan gaan leveren. Omdat de temperatuuropnemers elektrisch zijn gekoppeld aan de drukopnemers (zie paragraaf 3.1.1), betekent het uitvallen van een drukopnemer direct dat ook een eventueel nog bestaande temperatuuruitlezing uit die opnemer onbetrouwbaar is.

Voor de uitlezingen van de afstandopnemers in het DEBORA-1 experiment betekende dit dat eventueel gepoogd zou kunnen worden middels het van tijd tot tijd handmatig doormeten van de signaaldraden de werkelijke stand van de opnemers te volgen. Ook zou door gebruik te maken van het feit dat zich slechts ‘valse’ contacten voordoen geprobeerd kunnen worden uit de meetresultaten de wisselpunten te achterhalen en daarmee het verloop van de convergentie af te leiden (zie paragraaf 3.1.4). De uitlezingen van beschadigde drukopnemers zouden niet gecorrigeerd kunnen worden, alleen eventueel uit deze gegevens volgende trends zouden nog relevante informatie kunnen bevatten.

Gezien de gevorderde staat van afbouw van het DEBORA-2 experiment ten tijde dat de meetproblemen in het DEBORA-1 experiment zich voordeden, is toen gekozen voor een aantal pragmatische oplossingen om vergelijkbare meetproblemen in het DEBORA-2 experiment zoveel mogelijk te voorkomen:

- Omdat bij de temperaturen die in het DEBORA-2 experiment werden verwacht waarschijnlijk ook vocht uit het te gebruiken zoutgruis zou vrijkomen, werd besloten het zoutgruisvolume in het DEBORA-2 experiment continu met droge stikstof te spoelen om het vrijkomende vocht af te voeren. Daarnaast werden de afstandopnemers in het DEBORA-2 experiment voorzien van veel kleinere ontluchtingsgaatjes om de uitwisseling van zoutig vochtige lucht in het zoutgruis met de lucht in de opnemers zoveel mogelijk te beperken. Tenslotte werd gekozen voor het verhogen van de spanningsverschillen tussen de contactpennen om het contrast tussen wel en geen contact te verhogen; een overgang naar wisselspanning voor de continue convergentiemetingen zou binnen het kader van het BAMBUS project te begroetelijk zijn geworden, zowel in financiële zin als in de daarvoor benodigde ontwikkeltijd.

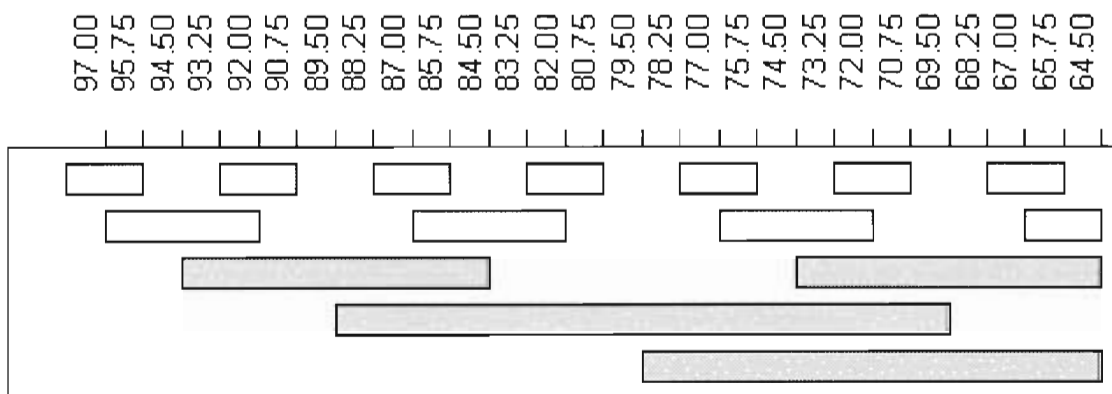
- Omdat nader onderzoek uitwees dat het verlengen van de beschermende siliconen neus voor het drukmembraam van de druksensor tot een te groot signaalverlies zou leiden, werd besloten de drukopnemers in het DEBORA-2 experiment te beschermen tegen beschadiging door scherpe zoutschilfers door voor de opnemers zakjes met fijn keukenzout aan te brengen. Het fijne keukenzout, dat met uitzondering van de korrelgrootte in eigenschappen vergelijkbaar is met Assezout, verdeelt de druk gelijkmatig over het gehele drukmembraam zodat dit niet beschadigd raakt. De correcte werking van deze constructie werd middels een oedometer test door GRS aangetoond (zie paragraaf 3.1.5).

Onderzoek van een afstandopnemer na ontmanteling van het DEBORA-1 experiment bevestigde de bovenbeschreven meest waarschijnlijke oorzaak van falen van deze opnemers. Het vlekkeloos meetgedrag van vrijwel alle opnemers in het DEBORA-2 experiment – één axiale drukopnemer werkte niet, waarschijnlijk door kortsluiting in een signaaldraad ontstaan tijdens de montage – heeft aangetoond dat de toegepaste maatregelen afdoende waren.

### 3.1.4 Reconstructie convergentiedata DEBORA-1

Het signaal van de afstandopnemers in de DEBORA experimenten beruiste op voltageverschillen overeenkomend met een gray-code, die correspondeerde met bepaalde meetintervallen. Omdat, zoals in paragraaf 3.1.3 al was aangegeven, de meetsignalen van de afstandopnemers van het DEBORA-1 experiment waarschijnlijk ‘slechts’ gecorrumpereerd waren door valse contacten veroorzaakt door op de contactpennen neergeslagen geleidend materiaal, kon geprobeerd worden het ‘werkelijke’ signaal te reconstrueren.

De meetafstand aangegeven door een afstandopnemer van DEBORA-1 kan bepaald worden uit de uit de meetuitslag te bepalen code. Daarvoor is een vijf-cijferige zogeheten gray-code gebruikt, een code die de eigenschap heeft dat per positiewisseling altijd slechts één bit verandert: een 1 bij contact over de codeplaat, een 0 bij ontbreken van contact door een sleuf in de codeplaat. In de onderstaande figuur is de relatie tussen de code en de meetafstand weergegeven.



figuur 5 DEBORA-1 codeplaat met sleuven en corresponderende meetafstanden (mm)

Bij het reconstrueren van de signalen is de volgende procedure gevolgd:

- Er is van uitgegaan dat de verplaatsingen van de opnemers altijd in afnemende richting zijn. Dit betekent als een uitlezing wijst op een toename van de annulus-dikte dat òf de voorgaande uitlezingen te klein waren, òf de nieuwe uitlezing te groot.
- Uitlezingen kunnen altijd maar één stapje (1.25 mm) per keer afnemen. Dit betekent als een uitlezing wijst op een afname van meer dan 1 stapje òf de voorgaande uitlezing(en) te groot waren, òf de nieuwe uitlezing te klein.
- Correcties in het bij de uitlezing behorende bit-patroon moeten zo klein mogelijk zijn. Tegelijkertijd moet de correctie zo goed mogelijk aansluiten bij de handmatige uitlezing van de contactweerstand die enkele keren werden uitgevoerd.
- Bij gebrek aan voldoende informatie voor correctie van de uitlezing van een enkele opnemer wordt voor een schatting gebruik gemaakt van de trend in de uitlezing van de afstandopnemer op hetzelfde meetniveau.
- Bij gebrek aan informatie voor correctie van de uitlezing van beide afstandopnemers op hetzelfde meetniveau wordt voor een schatting gebruik gemaakt van de trend in de uitlezing van de afstandopnemers op de andere meetniveaus.

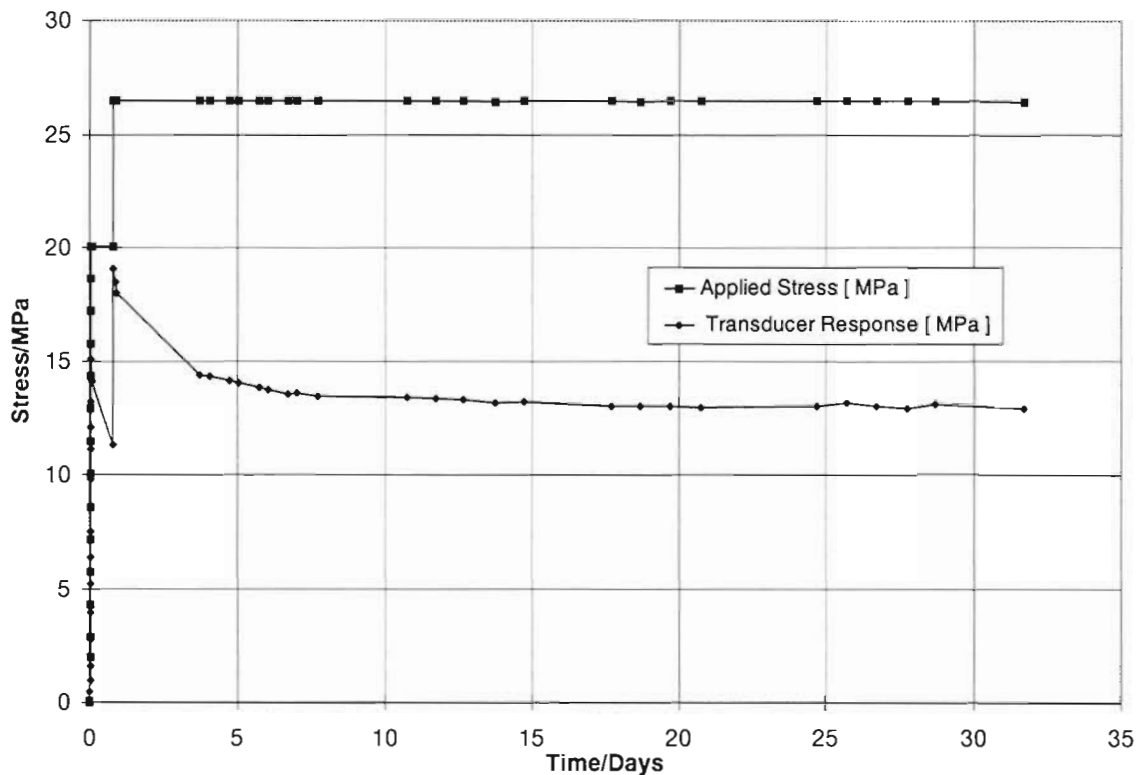
Met behulp van bovenstaande procedure waren de uitlezingen in de eerste maanden van het experiment goed tot zeer redelijk te reconstrueren. De grootste problemen deden zich voor in de interpretatie van de uitlezingen van de afstandopnemers op het middelste meetniveau, waarvoor vaak teruggevallen moest worden op trendgedrag van de andere opnemers. Vier maanden na het begin van het experiment gaven de volgens de bovenstaande procedure bepaalde gecorrigeerde uitlezingen aan dat de meeste opnemers nog slechts enkele millimeters van het eind van het meetbereik verwijderd waren. Deze inschatting werd nog onafhankelijk bevestigd door de ontwikkeling van de door GRS met behulp van inverse modellering bepaalde gemiddelde porositeit van het zoutgruis: deze gaf in de periode tussen 5 en 10 maanden na het begin van het experiment geen relevante afname van de porositeit meer te zien. Metingen aan de dikte en porositeit van de zoutgruislaag na ontmanteling van het DEBORA-1 experiment bevestigden de met behulp van bovenstaande procedure vastgestelde posities van de afstandopnemers, evenals de met behulp van de inverse methode bepaalde gemiddelde porositeit.

### *3.1.5 Kalibratie drukopnemers DEBORA experimenten*

Omdat de meetwaarden van de drukopnemers, die in beide DEBORA experimenten waren gebruikt voor de bepaling van de radiale spanning in de steenzout navulling, veel lager waren dan op grond van de door GRS vooraf gemaakte berekeningen verwacht werd, besloot GRS de respons van de drukopnemers in een representatieve opstelling in een oedemetertest te bepalen. Het vermoeden bestond namelijk dat de in het zoutgruis uitstekende delen van de ombouw van de opnemers de uitlezing daarvan relevant zou kunnen hebben beïnvloed.

De testopstelling was als volgt. Een drukopnemer werd opgesteld op de bodem van een oedemeter met het drukmembraam naar boven gericht. Het volume rond de drukopnemer werd gevuld met fijn zout tot een centimeter boven het drukmembraam om beschadiging van het membraam door

het grovere zoutgruis (< 8 mm) in de oedometer te voorkomen. De axiale druk op het zout werd in twee stappen opgevoerd (0.24 MPa/min) tot uiteindelijk 26 MPa. De kalibratiekrommen lieten zien dat steeds als de spanning constant werd gehouden de respons van de opnemer snel terugliep tot een niveau van ongeveer een factor 2 lager dan de aangelegde spanning (zie figuur 6).



figuur 6 Kalibratiemeting van de DEBORA drukopnemers

De testcondities in de kalibratietest voor de drukopnemers wijken echter af van die welke zich in de DEBORA experimenten hebben voorgedaan. In een oedometer opstelling met opgelegde axiale spanning is de laterale (radiale en omtrek-) spanning ongeveer 35% van de opgelegde axiale spanning (zie [1], paragraaf 3.4.1.4), hetgeen ook in de kalibratietest opstelling het geval moet zijn geweest. De hydrostatische druk was dus ongeveer 57% van de aangelegde spanning.

In de DEBORA experimenten is een van de spanningscomponenten dwars op het drukmembraam (omtrekspanning) gelijk aan de loodrechte spanningscomponent (radiale spanning), terwijl de tweede dwarse spanningscomponent (axiale spanning) ongeveer 50% van de radiale spanning bedroeg (zie [1], paragraaf 5.3.1.2). Door het effect van 'layering' bij storten van zoutgruis – zoals ook in de DEBORA experimenten is gebeurd – gaan de schilfervormige zoutkorrels preferentieel met hun smalste doorsnede in verticale richting liggen. Dit heeft onder meer tot gevolg dat de compactie in verticale richting een grotere weerstand ondervindt (zie [1], figuur 3.9b) waaruit voor de DEBORA experimenten weer een grotere (dan berekende) axiale spanningscomponent volgt. Omdat in de DEBORA experimenten de spanningscomponenten die van een hydrostatische spanningstoestand veel meer benaderen dan in de gebruikte kalibratietest opstelling, zou de uit de kalibratietest af te leiden spanningscorrectiefactor van 2 een overschatting kunnen zijn.



## 3.2 500m vrije-convergentie experiment

### 3.2.1 Voorgeschiedenis

In het kader van het zogeheten 600m boorgat project, dat deel uitmaakte van het CEC (1<sup>ste</sup>) kaderprogramma (1985-1989) en dat gezamenlijk werd uitgevoerd door GSF en ECN, zijn vanaf het 750m niveau in de Assemijn in de jaren 1988 en 1989 een aantal 60 cm diameter diepe boorgaten geboord die diepten bereikten van respectievelijk 101.5, 300.5 en 347.5 m. Het boren van deze boorgaten had tot doel:

- Het ontwikkelen van de techniek voor het droogboren van boorgaten tot op een diepte van 600m, zoals die voorzien zijn in het boorgatopslag concept: omdat water de enige transportweg vormt voor radionucliden in het opgeslagen afval is de gebruikelijke en bewezen techniek waarbij water als boorvloeistof wordt gebruikt voor het boren van diepe boorgaten voor deze toepassing ongeschikt.
- Het uitvoeren van in-situ metingen in de proefboorgaten, zowel om geschikte meettechnieken te ontwikkelen als om de kennis van de condities in de Asse zoutformatie te vergroten. Deze metingen behelsden variabele drukmetingen en vrije convergentiemetingen om het tijdsafhankelijke kruipgedrag van steenzout vast te stellen.
- Het ontwikkelen van een geautomatiseerd systeem voor de continue bemonstering en analyse van opgeboord zoutgruis en perslucht als alternatief voor uitgebreide verkenningsboringen tijdens de uitbouw van een opslagfaciliteit.

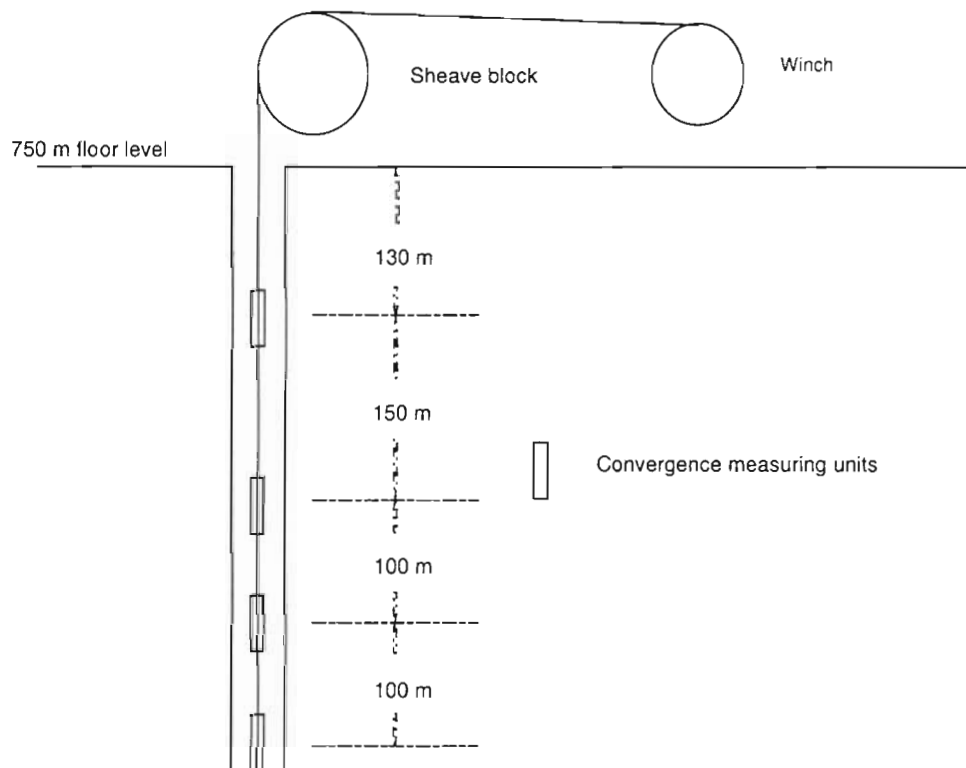
De ervaringen die met het boren van deze boorgaten is opgedaan, de meettechnieken die daarbij zijn ontwikkeld en de voor de Asse zoutformatie specifieke meetresultaten zijn ondermeer neergelegd in [23].

Het bovenbeschreven onderzoek is door GSF en ECN ook voortgezet als onderdeel van de daarop volgende CEC (2<sup>de</sup> en 3<sup>de</sup>) kaderprogramma's (1990-1992 en 1993-1995). De belangrijkste problemen die zich voordeden tijdens de eerdere proefboringen waren het ontstaan van onacceptabele afwijkingen van de boorrichting van de werkelijke verticaal en de betrouwbaarheid van de booruitrusting en boorkop. Daarom dan ook lag in de tweede periode de nadruk op de ontwikkeling van een nieuwe bestuurbare boorkop, terwijl daarnaast een nieuwe booruitrusting werd ontworpen, met onder meer een nieuwe dubbelwandige boorpijp voor het verpersen van het zoutboorsel. Door mechanische problemen met de booruitrusting duurde het uiteindelijk nog tot 1994 voordat een boorgat geboord kon worden tot op een relevant grotere diepte dan de eerder bereikte 300m: in maart 1994 werd een diepte van ruim 500m bereikt. Op die diepte moest de boring toen beëindigd worden wegens problemen met de boorkopsturing die samenhangen met de afvoer van zoutboorsel: voor de booruitrusting was op die diepte de fysieke limiet voor het via perslucht afvoeren van zoutboorsel bereikt.

Omdat aan het begin van de derde periode (1993-1995) geen boorgat met de beoogde diepte beschikbaar was, zijn toen gedurende een periode van ongeveer 200 dagen de beoogde vrije-convergentie metingen uitgevoerd in één van de wel beschikbare 300m boorgaten. Toen in een later stadium een boorgat van 500m beschikbaar kwam, zijn dezelfde meetframes gebruikt voor convergentiemetingen in dit boorgat. De resultaten van de metingen in het 300m boorgat, evenals de eerste meetresultaten van het 500m boorgat zijn te vinden in [24].

### 3.2.2 Ontwerp en uitvoering

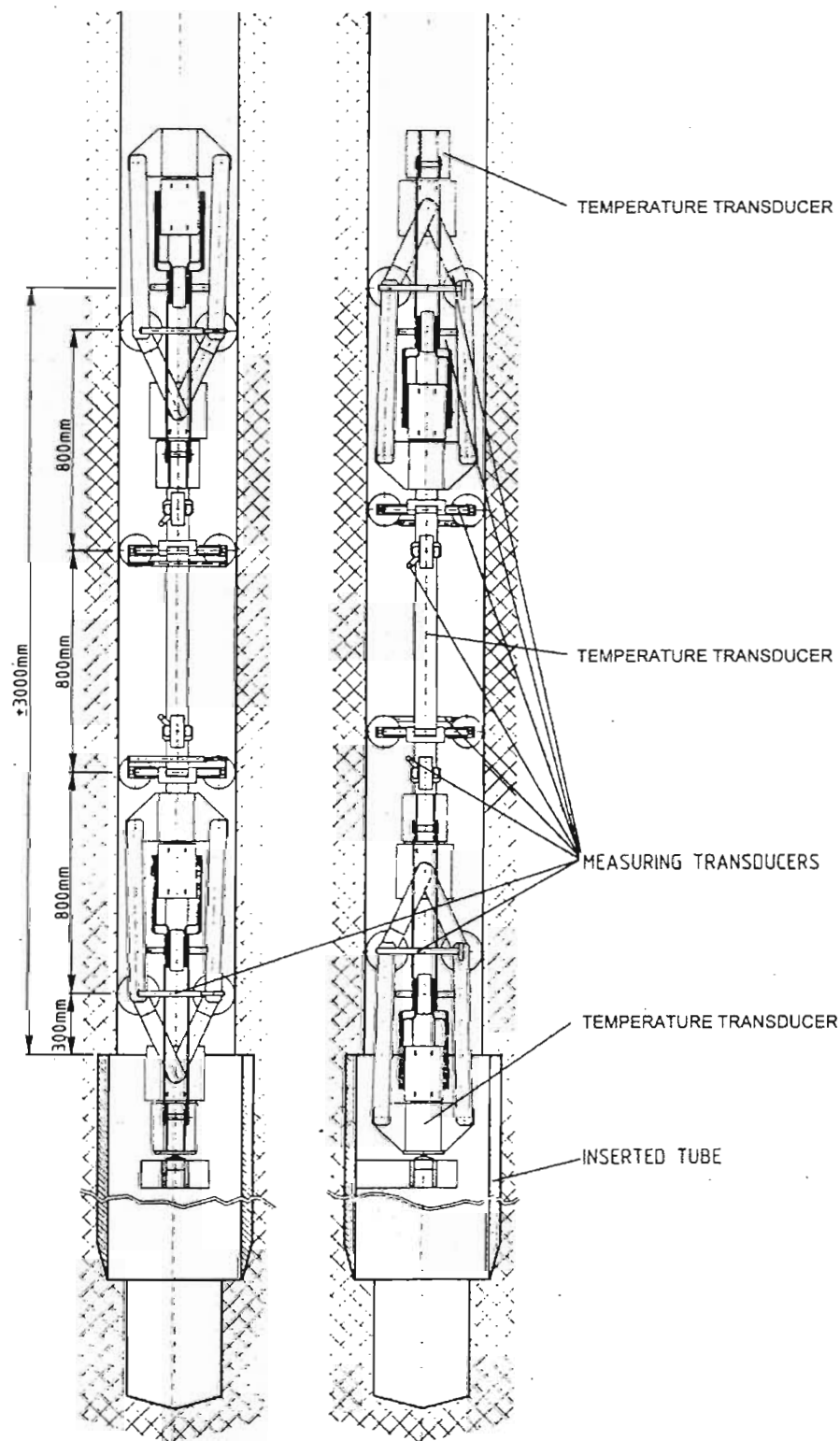
Na verdichting van het zoutgruis dat onder in het 500m boorgat was achtergebleven (om daarop de bodem meetunit te kunnen afsteunen) werden aan een speciale meet/hijskabel vier meetunits in het boorgat geplaatst. De bodem meetunit was om redenen van redundantie uitgerust met acht convergentie opnemers, de overige, hoger geplaatste meetunits bevatte slechts twee convergentie opnemers. Naast de convergentie van het boorgat werd op elke meetunit ook de temperatuur gemeten. Het ontwerp van het 500m vrije-convergentie boorgatexperiment is geschetst in figuur 7.



figuur 7 Opzet 500m vrije-convergentie boorgatexperiment

Vanaf 22 juli 1994 is de convergentie in het 500m boorgat gemeten op vier diepten die bepaald waren door de – oorspronkelijk voor een 600m diep boorgat ontworpen – meetkabel: op 130, 280, 380 en 480 meter onder de galerij op het 750m niveau. Omdat de convergentie onder in het boorgat inmiddels zo groot was geworden dat de bodem meetunit dreigde komen vast te zitten,

werd op 18 maart 1998 het 500m vrije-convergentie boorgatexperiment beëindigd, ruim vier jaar nadat de finale boordiepte in het boorgat was bereikt.



figuur 8 Bodem meetunit met convergentie en temperatuur opnemers

De meetunits in het 500m vrije-convergentie boorgatexperiment waren ontworpen en gefabriceerd door ECN-EE. Elk van de vier meetunits bestond uit een frame met een set opnemers. De opnemers waren op vaste posities elektrisch verbonden met de centrale hijskabel die tevens de elektrische verbindingen bevatte. De bodem meetunit, opgebouwd uit drie delen (zie figuur 8), mat de convergentie van het boorgat in twee loodrechte richtingen. De bovenste en onderste delen maten de radiale convergentie van het boorgat middels door veren uiteen gedrukte geleidingswielen, waardoor tegelijkertijd de meetunit in het boorgat werd gecentreerd. In het middelste deel van de bodem meetunit werd op twee plaatsen de boorgatdiameter gemeten. De meetuitslagen werden middels potmeters omgezet in een elektrisch signaal. Het meetbereik van de convergentie opnemers op de bodem meetunit bedroeg 420 tot 600 mm. Naast de convergentie werd op de bodem meetunit in elk van de delen ook (met een PT100 element) de temperatuur gemeten.

De drie andere meetunits waren qua ontwerp vergelijkbaar met het middelste deel van de bodem meetunit. Ze bestonden elk uit vier armen die door veren tegen de boorgatwand gedrukt werden gehouden. Het meetbereik van deze opnemers was iets kleiner: van 465 tot 605 mm. Ook op deze meetunits werd de temperatuur gemeten. De omzetting naar analoog elektrisch signaal ging weer via potmeters (convergentie opnemers) en een PT100 element (temperatuur).

Hoewel een geautomatiseerd data acquisitie systeem was ontwikkeld, bleek de communicatie met Petten toch zoveel problemen te leveren, dat na een half jaar werd besloten de data slechts te verzamelen in een PC in een cabine op de galerij op het 750m niveau en deze tweemaandelijks per floppy (later per e-mail) naar Petten te sturen. Vrijwel alle convergentiemeters werkten foutloos gedurende de gehele meetperiode; zelfs de twee opnemers die de eerste jaren niet functioneerden gaven na zo'n 3 jaar keurige signalen af, waarschijnlijk veroorzaakt door kleine seismische schok.

De goede ervaringen met de meetapparatuur in het 500m vrije-convergentie boorgatexperiment waren ook de belangrijkste aanleiding om de meetapparatuur te 'redden' voordat de bodem meetunit zou komen klem te zitten, met het doel deze apparatuur eventueel te kunnen hergebruiken voor toekomstig verkenningsonderzoek in andere zoutformaties. Bij het terughalen van de meetunits bleken deze, hoewel wat stoffig, onaangetast door de potentieel corrosieve omstandigheden waaraan ze ruim 3.5 jaar lang waren blootgesteld. In afwachting van eventueel hergebruik – en omdat na gebruik in een zoute omgeving blootstelling aan vocht binnen korte tijd funest is – werd de meetapparatuur opgeslagen in een cabine vlakbij het 500m boorgat op het 750m niveau in de Assemijn.

## 4 Constitutief gedrag van droog zoutgruis

Aan het begin van het BAMBUS project beschikte NRG – toen nog ECN-NE – slechts over een hydrostatisch model voor de beschrijving van het gedrag van zoutgruis [8]. In de studie die in dat rapport is beschreven lag de nadruk met name op het gedrag van *nat* zoutgruis, dat een veel geringere weerstand tegen compactie vertoont dan droog zoutgruis. De aandacht die in [8] is besteed aan nat zoutgruis is niet onbegrijpelijk: transport van radionucliden door pekkel lijkt de enige radiologisch relevante transportweg voor een opslagfaciliteit in steenzout. Echter, elke opslagfaciliteit in steenzout beoogt droog te zijn voordat door onvoorziene ontwikkelingen op een later tijdstip toch grondwater toetreedt. Daarom werd in het BAMBUS project de ontwikkeling van de isolerende werking van zoutgruis onder *droge* omstandigheden onderzocht.

Naast het hydrostatische model voor de beschrijving van het gedrag van droog zoutgruis in [8] waren ook enkele deviatorische modellen ontwikkeld [9, 10, 11, 12]. In [12] waren enkele deviatorische modellen ontwikkeld op basis van bestaande hydrostatische modellen. Daarvan kwam een model gebaseerd op het model voor nat zoutgruis uit [8] als meest veelbelovend naar voren om een grote reeks van metingen aan het gedrag van WIPP-zout te benaderen. Omdat dit goed aansloot bij het beschikbare model, besloot NRG voor het BAMBUS project in eerste instantie dit specifieke model uit [12] te gaan gebruiken. Doordat voor dit model (en allerlei varianten daarop) echter geen goede parameterfit met de laboratoriummetingen kon worden gevonden, moest in een later stadium een alternatief model ontwikkeld worden gebaseerd op [9].

### 4.1 Constitutieve relaties

Voor de constitutieve relaties voor het mechanische gedrag van zoutgruis werd uitgegaan van het experimentele werk beschreven in [8], waarbij de generalisatie naar deviatorische omstandigheden gebaseerd werd op [12, 25]. In deze generalisatie wordt de totale reksnelheid geschreven als de som van reksnelheden behorend bij vier processen: elastische rek (el), kruiprek (cr), thermische rek (th) en compactie rek (co)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{th} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{co} \quad (1)$$

#### 4.1.1 Elastische rek

De niet-lineaire elastische rek wordt beschreven door

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = \frac{\dot{\sigma}_m}{3K} \delta_{ij} + \frac{\dot{s}_{ij}}{2G} \quad (2)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{kk}}{3}, \text{ hydrostatische spanning} \\ s_{ij} &= \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}, \text{ deviatorische spanning} \\ \delta_{ij} &= \text{Kronecker delta.} \end{aligned} \quad (3)$$

De bulkmodulus  $K$  en de schuifmodulus  $G$  zijn functies van de dichtheid  $\rho$ , die volgens [12] beschreven worden als:

$$\begin{aligned} K &= K_0 e^{K_1 \rho} \\ G &= G_0 e^{G_1 \rho} \\ \rho &= \frac{\rho_0}{1 + \varepsilon_v^{\text{eng}}} = \rho_0 e^{-\varepsilon_v^{\text{true}}} \end{aligned} \quad (4)$$

waarin  $\rho_0$  de initiële dichtheid van het zoutgruis is en  $\varepsilon_v^{\text{eng}}$  de engineering rek en  $\varepsilon_v^{\text{true}}$  de ware rek van het zoutgruis aangeeft. De waarden van  $K$  en  $G$  kunnen ook afgeleid worden van waarden van de Young's modulus  $E$  en Poisson's modulus  $\nu$ :

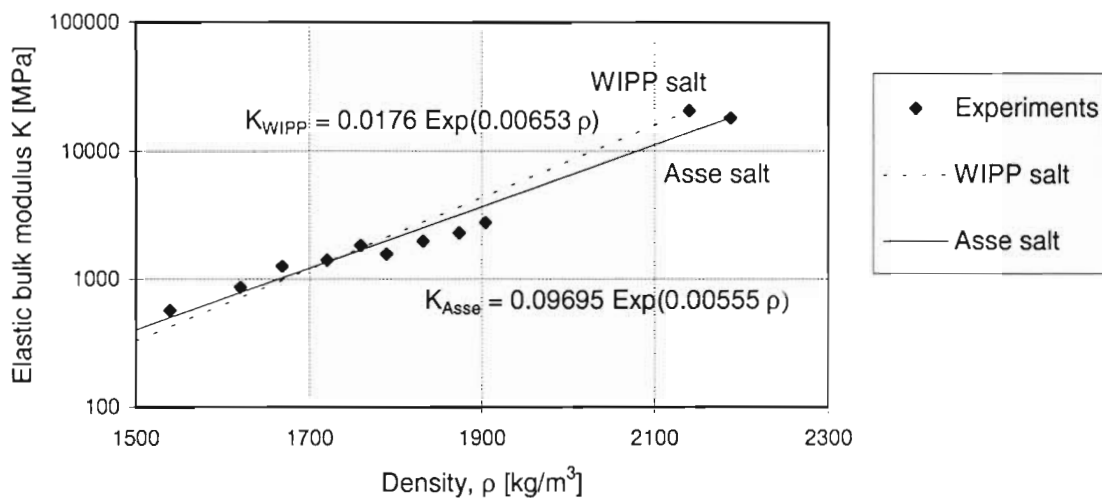
$$\begin{aligned} K &= \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \quad (5)$$

Onder aanname dat de constanten  $K_1$  en  $G_1$  gelijk zijn (zie [26]) is de Poisson's modulus geen functie van de dichtheid en kan de Young's modulus geschreven worden als:

$$E = E_0 e^{E_1 \rho} \quad \text{en} \quad E_1 = K_1 \quad (6)$$

Onder aanname dat  $\nu = 0.27$  en  $E = 25000$  MPa voor intact Asse steenzout ( $\rho_f = 2187 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) moet  $K$  naar 18120 MPa tenderen voor intact zout, een waarde die, zoals in figuur 9 getoond, zelfs nog beter past bij de meetwaarden voor zoutgruis (Figure 2-1 van [12]) dan de waarde voor  $K$  van intact WIPP zout.

Approximation of the Elastic Bulk Modulus, K



figuur 9 Bulkmodulus K op basis van meetdata WIPP en Asse zout

Omgeschreven naar een relatie in de porositeit wordt dan voor de Young's modulus  $E$  gevonden:

$$E(\varphi) = 25000 e^{-12.13785\varphi} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

#### 4.1.2 Kruiprek

Zowel voor steenzout als voor het zoutgruis wordt er van uitgegaan dat de secundaire kruiprek-snelheid beschreven wordt door een voorschrift volgens von Mises. De kruiprek componenten zijn dan:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} A_1 e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\sqrt{3J_2}}{\sigma_{ref}} \right)^{n_1} \frac{s_{ij}}{\sqrt{3J_2}} \quad (8)$$

waarin  $\sqrt{3J_2}$  de deviatorische spanning is met  $J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ji}$ . Voor de model benchmark in het BAMBUS project waren de parameterwaarden voor Asse steenzout vastgesteld (zie tabel 2).

tabel 2 Kruiprek parameters voor Asse steenzout

Parameter	Eenheid	Waarde [1]
$A_1$	dag <sup>-1</sup>	0.18
$Q/R$	K	6495
$n_1$	-	5
$\sigma_{ref}$	MPa	1

#### 4.1.3 Thermische rek

De componenten van de thermische kruipreksnelheid worden beschreven door:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{th} = \alpha \dot{T} \delta_{ij} \quad (9)$$

waarin  $\alpha$  de coëfficiënt van de lineaire thermische uitzetting is:  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$  m/mK [1].

#### 4.1.4 Compactierek (Callahan model)

De gegeneraliseerde compactie reksnelheid wordt beschreven door een niet-associatief voorschrift (zie bijvoorbeeld [12, 25]):

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{co} = \dot{\varepsilon}_{eq}^{co} \left( \sigma_{eq}^f \right) \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

In [12] en [25] werden verschillende uitdrukkingen voor equivalente spanningsmaten  $\sigma_{eq}^f$  en  $\sigma_{eq}$  gebruikt, waarbij de laatste een betere benadering van de experimenten op WIPP zoutgruis zou geven. In beide referenties zijn de equivalente spanningsmaten een lineaire functie van de hydrostatische en deviatorische spanningen, waarbij de hydrostatische component als functie van de porositeit naar nul gaat als de porositeit naar nul gaat. In beide referenties werd de deviatorische spanning beschreven als een Tresca equivalente spanning:

$$\begin{aligned}
|\sigma_1 - \sigma_3| &= 2 \cos \psi \sqrt{J_2} \\
\psi &= \frac{1}{3} \arcsin \left[ -\frac{3\sqrt{3} J_3}{2J_2^{3/2}} \right], \quad |\psi| \leq \frac{\pi}{6}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{jk} s_{ki}
\end{aligned} \tag{11}$$

Als variatie op de modellering in [8] werd in beide referenties [12] en [25] de equivalente compactie reksnelheid beschreven als:

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{co}(\sigma_{eq}^f) = \frac{r_1}{d^p} \left( 1 + a_1 (1 - e^{-a_2 w}) \right) e^{-\frac{Q_c}{RT}} \left( \frac{\exp(r_3 \varepsilon_V^{irue})}{|\exp(\varepsilon_V^{irue}) - 1|^{r_4}} \right) \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^n \sigma_{eq}^f \tag{12}$$

waarin:

- $d$  zoutkorrel dimensie
- $w$  relatieve vochtigheid van het zoutgruis
- $\varphi$  porositeit (subscript 0: referentie porositeit)

Hoewel op zich de aanpak beschreven in [12] en [25] uit het oogpunt van theorievorming een zekere schoonheid niet ontzegd kan worden, en het feit dat de voorgestelde functies voor de equivalente spanningsmaten over een voldoende groot aantal parameters leken te beschikken om flexibiliteit bij een fit aan welke data dan ook te garanderen, bleek met deze aanpak geen fysisch gelijkende data-fit te fabriceren van het in de BAMBUS model benchmark beschreven deviatorische gedrag van zoutgruis zoals dat gemeten was in oedometer tests en tri-axiaal tests in het gebied van hoge porositeit (20 – 30%) en opgelegde relatief lage compactiesnelheid. Bij de berekende spanningsopbouw in het zoutgruis zoals die in een oedometer test zich zou ontwikkelen gaven de axiale and radiale spanningen altijd tweefasige krommen te zien: eerst een toename volgens een min of meer kwadratische kromme, die na verloop van tijd gaat afvlakken naar een lager toenametempo, die uiteindelijk weer wordt gevolgd door een sterke toename van de spanningen. De metingen gaven een voor beide spanningscomponenten vergelijkbaar maar van de berekeningen geheel afwijkend beeld: een lineaire toename van de spanning, gevolgd door een sterkere spanningstoename bij nadering van volledige consolidatie (min of meer lineair kwadratisch dus). Om die redenen werd besloten om de bovenbeschreven modellering van de compactie reksnelheid te verlaten en aansluiting te zoeken bij een meer succesvol gebleken model.

#### 4.1.5 Compactierek (Hein model)

Verschillende van de partners in het BAMBUS project maakten gebruik van een beschrijving van het constitutief van zoutgruis gebaseerd op [9]. Toen alle eerdere pogingen om een goede beschrijving te ontwikkelen op basis van [8, 12, 25] waren stukgelopen, werd besloten de beschrijving van [9] als richtpunt te gebruiken voor een beschrijving van het compactiegedrag van zoutgruis op basis van de in het begin van paragraaf 4.1 beschreven scheiding in processen. In de variant van [9] beschreven in [7] waren elastische en compactie reksnelheden in één beschrijving opgenomen. Omdat bij volledige consolidatie zoutgruis overgaat in steenzout kon de elastische reksnelheid eenvoudig uit de formulering in [7] worden afgescheiden. Dit leidde tot de volgende equivalente spanningsmaten, toe te passen in het voorschrift (10):



$$\sigma_{eq}^f = \sigma_{ref} \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{ref}} \right)^{n_{co}} \quad (13)$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_{ref} \left( \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{ref}} \right)^2 + b \left( \frac{\sqrt{3J_2}}{\sigma_{ref}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

waarbij de equivalente compactie reksnelheid werd beschreven door:

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{co}(\sigma_{eq}^f) = \frac{a}{(\varphi^{-c} - \varphi_0^{-c} + d)^m} e^{-\frac{Q}{RT}} \sigma_{eq}^f \quad (14)$$

Hoewel met deze beschrijving heel goede fits konden worden gevonden van het gemeten gedrag van zoutgruis in oedometertests bij opgelegde compactiesnelheid, bleek de beste benadering van alle voor Benchmark probleem 1.1 door de BGR geleverde curven (zie bijvoorbeeld [1], figuur 3.2) gevonden te worden als een lineaire afhankelijkheid van de parameter  $a$  in (14) van de opgelegde compactiesnelheid werd aangenomen. Omdat dit in feite het best verklaard kon worden door het bestaan van interne wrijving in de oedometertests – die door afwijkende metingen in een andere oedometer later inderdaad werd aangetoond – werd besloten de parameters in (13) en (14) alleen te fitten aan de uitgebreide dataset van FZK (zie [1], tabel 3.4), waarvoor was aangetoond dat interne wrijving geen rol van betekenis vormde.

Bij het zoeken naar de beste fit aan de FZK data bleek geen eenduidig beste oplossing te kunnen worden gevonden, maar alle goede oplossingen hadden gemeen dat het product van de parameters  $m$  en  $c$  (vrijwel) gelijk was. Met deze waarneming was de beschrijving van de equivalente compactie reksnelheid verder te vereenvoudigen tot:

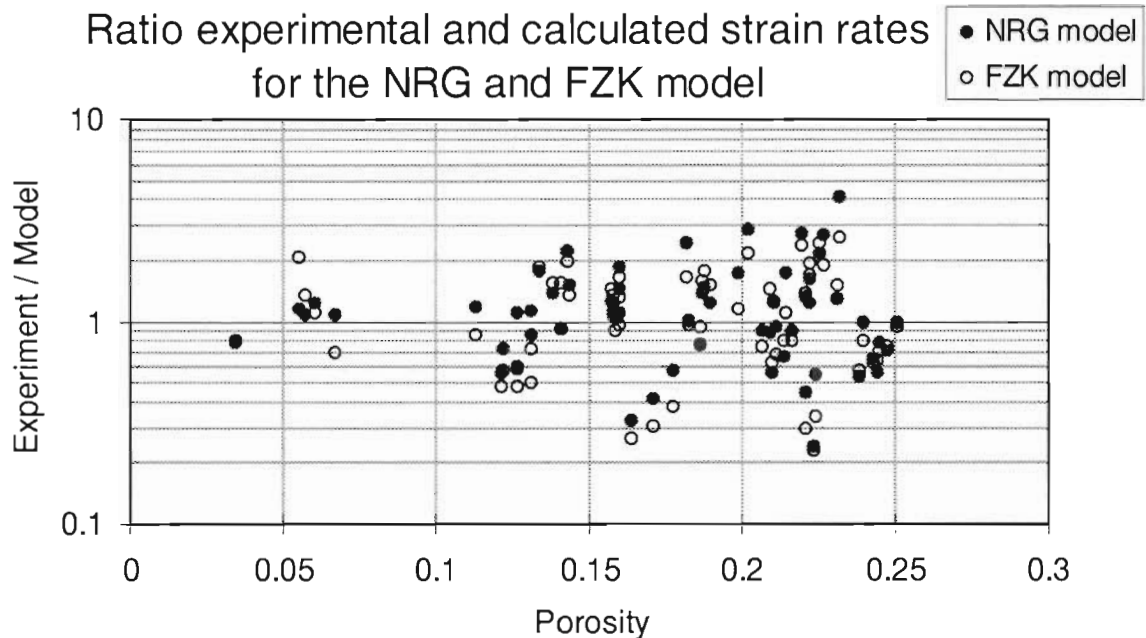
$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{co}(\sigma_{eq}^f) = \frac{a}{\ln^m(\varphi_0 / \varphi)} e^{-\frac{Q}{RT}} \sigma_{eq}^f \quad (15)$$

waarin  $\varphi_0$  een fractie groter dan de beginporositeit moet worden genomen om deling door nul aan het begin van de berekening te voorkomen:  $\varphi_0 = \varphi_{init} + 0.01$ . De best-fit parameters voor de FZK data staan in onderstaande tabel.

tabel 3 Best-fit parameterwaarden compactie reksnelheid

Parameter	Waarde
$a$	$1.42 \cdot 10^{-6}$
$b$	0.621
$m$	5.159
$Q/R$	4948.7 [K]
$n_{co}$	3.812

In figuur 10 is een vergelijking weergegeven van het NRG model met de meetresultaten van de FZK experimenten. Om dit in perspectief te zetten toont deze figuur ook dezelfde vergelijking voor het FZK model [7].



figuur 10 Vergelijking van het NRG model en het FZK model met de experimentele metingen

#### 4.2 Performance van het NRG model

In de berekeningen voor de model benchmark CS<sup>2</sup> van het BAMBUS project heeft NRG alleen gebruik gemaakt van de parameterset gefit aan de FZK data (zie [1], tabel 3.4) en niet aan de BGR data (zie bijvoorbeeld [1], figuur 3.2). In het algemeen kan gesteld worden dat zoutgruis volgens de BGR metingen zich wat stijver gedraagt dan volgens de FZK metingen.

##### 4.2.1 Benchmark fase I

In deze fase werden twee eenvoudige theoretische problemen gemodelleerd: (1) een oedemeter test met voorgeschreven rektempo en (2) compactie van een oneindig lang met zoutgruis nagevuld boorgat omringd door een steenzout medium onder 20 MPa radiale druk.

1. Ondanks dat het NRG model gebaseerd was op de FZK data kwamen de daarmee berekende ontwikkeling van de spanningen redelijk overeen met de BGR data voor dit probleem. In de eerste 200 dagen bleef de opbouw van de axiale spanning iets achter bij de metingen. Dit verschil stabiliseerde zich daarna op 2.5 MPa. Dit verschil lijkt goed te verklaren door wandfrictie in de oedometer testopstelling (zie paragraaf 4.1.5).
2. De convergentie van het boorgat verliep in de NRG modelberekeningen – met een parameterset gebaseerd op de FZK data – veel sneller dan met de modellen van de andere partners die gebruik maakten van een parameterset gebaseerd op BGR data. De spannings-

opbouw in het zoutgruis was echter vergelijkbaar. Dit gedrag laat zich verklaren uit het verschil in stijfheid van het zoutgruis af te leiden uit de beide data sets.

#### 4.2.2 *Benchmark fase II*

In de tweede fase van de benchmark werden twee (benaderingen van) experimenten nagerekend: (1) een hydrostatische compactietest met een variabel compressieve spanningshistorie, die in het kader van de benchmark ook werd uitgevoerd in laboratoria van 3 partners, en (2) compactie van een oneindig lang met zoutgruis nagevuld boorgat rond een centrale heater omringd door een steenzout medium onder 10 MPa radiale druk, een vereenvoudiging van het TSDE experiment.

1. De spreiding van de berekende convergentiecurven van alle modellers lag ruim binnen range van de experimentele curven van de drie laboratoria die de test daadwerkelijk hadden uitgevoerd. De uitkomsten van het NRG model lagen enigszins aan de bovenkant van de range van de andere modellen (relatief minder convergentie).
2. De ontwikkeling van de convergentie van het boorgat verliep voor alle op de FZK dataset gebaseerde modellen op vergelijkbare wijze, al moet gezegd worden dat het NRG model hierbij relatief de snelste initiële convergentie berekende; bij hoge consolidatie werd echter een grotere convergentieweerstand berekend. Dit uit zich dan ook in de met het NRG model relatief hogere berekende radiale (en omtrek) spanningen bij hoge consolidatie; de berekende axiale spanning bij hoge consolidatie was daarentegen relatief lager.

#### 4.2.3 *Benchmark fase III*

Ook de derde fase van de benchmark bestond uit twee delen: (1) het doorrekenen, met een parameterset gebaseerd op FZK data, van een veel betere – maar nog steeds 2-dimensionale – benadering van het TSDE experiment, inclusief een groot blok omringend steengruis, en (2) een directe vergelijking van de modellen, met een parameterset gebaseerd op FZK data, op hydrostatische en deviatorisch rektempo als functie van temperatuur, porositeit en (deviatorische) spanningen.

1. Evenals in het tweede deel van de vorige benchmark fase verliep de berekende ontwikkeling van de convergentie van de drift met het NRG model initieel relatief het snelst, al werd dit bij hogere consolidatie geheel gecompenseerd zodat aan het eind van de 10 jaar modeltijd de met het NRG model berekende convergentie relatief het geringst was. In absolute termen was het verschil verwaarloosbaar zoals ook zichtbaar was uit de berekende rekken en spanningen.
2. In de directe modelvergelijking op rektempo scoorde het NRG model meestal in het midden van de range gevormd door de resultaten van de andere partners. Alleen in het gebied van hydrostatische spanningen van zo'n 5 – 10 MPa, temperaturen 120 – 160 °C en porositeit 5 – 10% vormde het NRG model de onderzijde van de range, een factor 3 kleiner dan de mediaan.

#### 4.2.4 Discussie

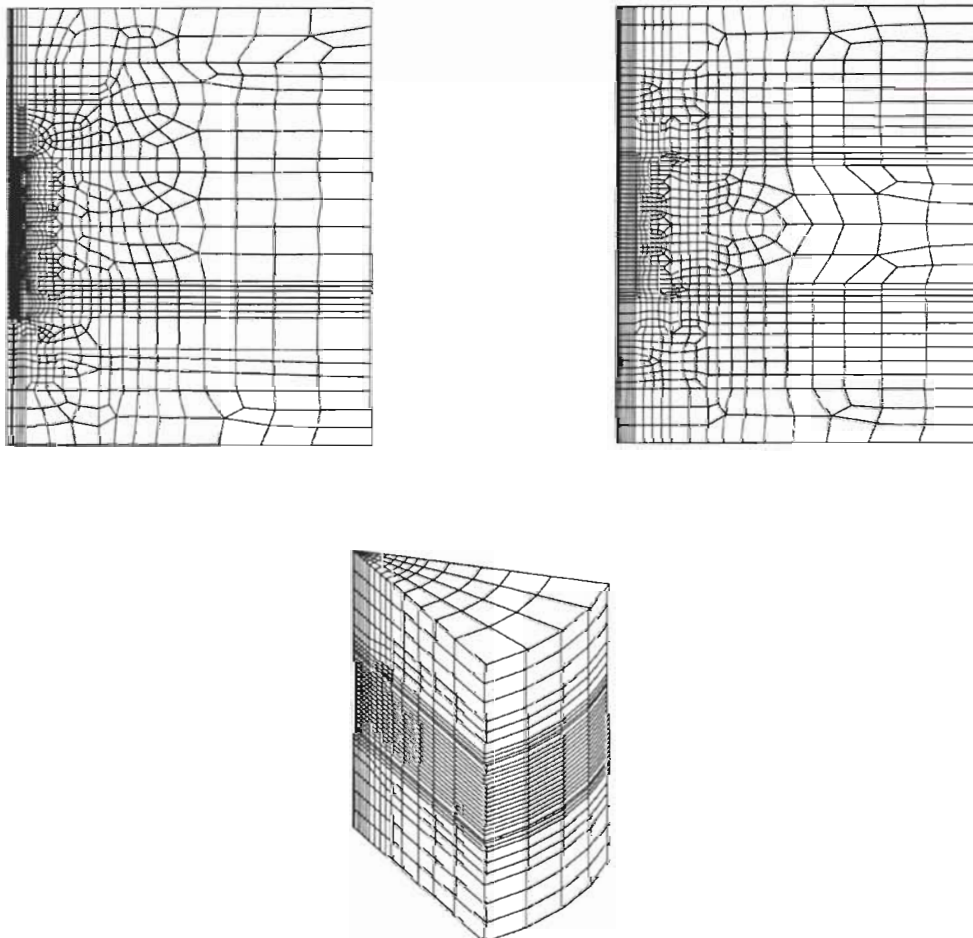
Het NRG model voor het gedrag van droog zoutgruis dat in het BAMBUS project is ontwikkeld verhoudt zich als een van de beste in de benchmark beschouwde modellen met de laboratorium meetdata van FZK. Bij de modelvergelijking op het gebied van rektempo als functie van temperatuur, porositeit en deviatorische spanningen scoort het NRG model meestal middenin de (typisch een factor 10) brede range van de overige modellen. Alleen in een ‘middengebied’ (hydrostatische spanningen 5 – 10 MPa, temperaturen 120 – 160 °C en porositeit 5 – 10%) vormt het NRG model de onderzijde van de range. De relatief snelle convergentie die met het NRG model werd berekend in de benchmark problemen II.2 en III.1 moet dan ook waarschijnlijk toegeschreven worden aan het gebruik van fijnere rekenruiden en kleinere tijdstappen dan de andere partners. De prijs hiervoor moest uiteraard betaald worden in de vorm van (veel) langere rekkentijden.

## 5 Modelberekeningen aan in-situ experimenten

Het in de CS<sup>2</sup> benchmark ontwikkelde model voor het gedrag van droog zoutgruis is door NRG ook toegepast op beide in-situ DEBORA experimenten die in het BAMBUS project zijn uitgevoerd (zie paragraaf 3.1). Het doel daarvan was uiteraard om het ontwikkelde model te toetsen aan de realiteit van een grootschalig experiment in steenzout. Daarnaast zijn ook modelberekeningen uitgevoerd aan het 500-m vrije-convergentie experiment.

### 5.1 DEBORA experimenten

Voor het doorrekenen van beide DEBORA experimenten werd een axisymmetrisch model ontwikkeld waarin het boorgat (met heater: DEBORA-1) centraal stond. Omdat het DEBORA-2 experiment voorzien was van 4 perifere heaters werd voor dit experiment ook een 3-dimensionaal model gebouwd om na te gaan of de benadering van deze heaters door een cilindrische heater geen te grove vereenvoudiging was. De DEBORA experimenten waren uitgevoerd in een galerij van het HAW-veld. Door de axisymmetrische modellering kon de daadwerkelijke vorm van de galerij niet worden verdisconteerd. Het door NRG gebruikte rekengrid is geschetst in figuur 11.



figuur 11 Eindige-elementen grid gebruikt door NRG voor de analyses van DEBORA 1 (links) en DEBORA 2 (rechts: 2-dimensionaal grid en onder: 3-dimensionaal grid)

Het rekendomein voor alle modellen was 24 meter hoog en had een straal van 20 meter. Voor de initiële temperatuur was 310 K genomen, terwijl voor de initiële spanningstoestand was uitgegaan van een hydrostatische spanning van 9 MPa, overeenkomend met de effectieve spanningstoestand afgeleid uit het 500m vrije-convergentie experiment (paragraaf 5.2). Bij de berekeningen was de onderzijde van het grid gefixeerd, terwijl op de verticale zijden een radiale spanning van 9 MPa werd aangehouden. Op de bovenzijde van het grid werd een axiale spanning van 9.6 MPa aangehouden, met uitzondering van een cirkel met een straal van 5 m waar, ter modellering van de bovenliggende galerij, geen axiale spanning was opgelegd.

De lay-out van de modellen was verder zoveel mogelijk naar de realiteit, waarbij ook zoveel mogelijk de betreffende materiaaleigenschappen zijn gebruikt. Ook de ontwikkeling in de tijd vóór het opstarten van de experimenten werd zoveel mogelijk nagebootst: het uitgraven van de galerij, het boren van de boorgaten, het opboren van de gaten ten behoeve van de experimenten en installatietijd van de experimenten. In de berekening van het DEBORA-1 experiment werd de via de heater aan het experiment nominale toegevoerde warmte met een factor 75% gereduceerd ter verdiscontering van warmteverliezen (waarschijnlijk via convectie ‘binnen’ de heater) zoals die ook in het voormalige HAW experiment was waargenomen<sup>3</sup>.

#### 5.1.1 DEBORA 1

De resultaten van de modelberekeningen in termen van temperatuur en convergentie kwamen goed overeen met de gemeten waarden, al was de convergentie in de periode tussen 1 en 4 maanden na het begin van het experiment iets sneller dan waargenomen: dit zou een effect kunnen zijn van de modelbenadering van de bovenliggende galerij. Overigens lijkt dit gedrag ook op de relatief snelle convergentie voor het NRG model zoals die gevonden werd in de CS<sup>2</sup> benchmark opgaven II.2 en III.1 (zie paragraaf 4.2) zodat het een artefact kan zijn van de voor de tuning van de modelparameters gebruikte FZK dataset. De afwijking is overigens niet groot.

Het verschil tussen de berekende en ‘gemeten’ radiale spanningen in het DEBORA-1 experiment is echter veel groter: de berekende waarde naderde een ‘eindwaarde’ van ongeveer 7 MPa, terwijl de (met een factor 2 gecorrigeerde) meetwaarden 13 – 15 MPa bedroegen. De grootte van de toegepaste correctiefactor is echter discutabel (zie paragraaf 3.1.5).

#### 5.1.2 DEBORA 2

De modelberekening van de temperatuur van DEBORA 2 kwam goed overeen met de meetwaarden, zowel in het 2-dimensionale als het 3-dimensionale model. Beide modellen leverden een kleine overschatting van de eindtemperatuur.

---

<sup>3</sup> De heater in het DEBORA-1 experiment was dezelfde die eerder ook in het HAW experiment was gebruikt!

De berekende convergentie verliep echter veel sneller dan in het experiment werd waargenomen. In het 3-dimensionale model verliep de convergentie slechts weinig langzamer dan in het 2-dimensionale model zodat het verschil met het experiment niet aan de cilindrische modelbenadering van de 4 perifere heaters kan worden toegeschreven. Er bestaat echter een belangrijk verschil tussen het zoutgruis dat in het DEBORA-2 experiment werd gebruikt en het zoutgruis dat is gebruikt voor de kalibratie van het rekenmodel: het zoutgruis in het testvolume van het DEBORA-2 experiment werd continu gespoeld met droog stikstofgas om het binnendringen van zout in de afstandopnemers te voorkomen (zie paragraaf 3.1.3). Hoe droger het zoutgruis is hoe kleiner het effect van het door vocht gestuurde FADT-compactieproces [8] zodat dit drogere zoutgruis ook een stijver gedrag zal vertonen, wat zich weer zou vertalen in een lager convergentie tempo.

De berekende radiale spanning verschilde ook aanzienlijk met de (met een factor 2 gecorrigeerde) 'gemeten' spanningen: in beide modellen werden radiale spanningen berekend die afhankelijk van de diepte naar eindwaarden tussen 6 en 10 MPa tenderden; de gemeten radiale spanningen bedroegen (op ca. 160 dagen na het begin van het experiment, daarna werden de meetwaarden onbetrouwbaar) respectievelijk 8 (10 m), 6 (12 m) en 16 MPa (14 m diepte). De toegepaste correctiefactor is echter discutabel (zie paragraaf 3.1.5). Een stijver zoutgruisgedrag zou bij dezelfde porositeit een hoger spanning te zien geven, zodat bij een waargenomen langzamere convergentie toch een zelfde spanningsopbouw kan optreden.

### 5.1.3 *Vergelijking met andere partners*

Naast de verschillen tussen de partners in de gebruikte modellen voor het gedrag van zoutgruis vormt ook de aangenomen gesteentedruk op de randen van het model (9 – 12.5 MPa) een mogelijk relevant verschil. Ook de voor de DEBORA experimenten gebruikte numerieke modellering vormt een belangrijk verschil:

- In de modellen van GRS en UPC zijn de invloeden van de bovenliggende galerij expliciet gemodelleerd in de vorm van een paddestoelvormig volume, terwijl de galerij in het model van NRG als een vrij oppervlak aan de bovenzijde van het rekendomein werd gedefinieerd.
- Het beschouwde rekendomein van de modellen liep uiteen. De modellen van GRS beperkten zich ruwweg tot een bol met een straal van 100 m gecentreerd rond het midden van het boorgat.  
De modellen van UPC rekenden in een cilinder met een straal van 100 m (DEBORA-2: 50 m) en een hoogte van 200 m (DEBORA-2: 100 m) symmetrische rond het vloerniveau van de galerij.  
De modellen van NRG beperkten zich tot een cilinder vanaf de vloer van de galerij tot 24 m diepte met een straal van 20 m.
- De bij de berekeningen gebruikte elementgrootte liep sterk uiteen. De dimensies van het elementen in de modellen van GRS liep uiteen van centimeters tot tientallen meters; totaal werden 752 vierhoekige elementen gemodelleerd (gemiddeld 21 m<sup>2</sup>).

In de modellen van UPC verliepen de dimensies van de elementen van het boorgat naar de rand veel vloeiender dan in de modellen van GRS; totaal werden voor het DEBORA-1 model 994 vierhoekige (gemiddeld 20 m<sup>2</sup>; DEBORA-2: 1376 driehoekige, gemiddeld 3,6 m<sup>2</sup>) elementen gemodelleerd.

In de modellen van NRG verliepen de dimensies nog geleidelijker dan bij de modellen van UPC; totaal werden voor het DEBORA-1 model 1741 (gemiddeld 0,276 m<sup>2</sup>; DEBORA-2: 1452, gemiddeld 0,33 m<sup>2</sup>) vierhoekige elementen, in het 3-dimensionale DEBORA-2 model 2040 achthoekige elementen (gemiddeld 1,85 m<sup>3</sup>) gemodelleerd.

Het GRS-model vertoont een snel verloop in de afmetingen van de gebruikte rekenelementen, met een factor 10000 verschil tussen de oppervlakte van de grootste en kleinste elementen. Gekoppeld aan het feit dat vierhoekige elementen een relatief stijf numeriek gedrag kunnen vertonen, kan de precieze elementkeuze een belangrijke invloed hebben gehad op de berekende resultaten. Binnen het BAMBUS project is de invloed hiervan niet nagegaan.

De UPC-modellen vertonen een veel geleidelijker overgang van kleine naar grote elementen dan het GRS-model. De verhouding tussen de oppervlakte van grootste en kleinste elementen bedroeg ongeveer een factor 3000. Daarnaast zijn voor het DEBORA-2 experiment driehoekige elementen gebruikt die numeriek een veel minder star gedrag vertonen dan vierhoekige elementen. Binnen het BAMBUS project is de invloed van de elementgrootte op de rekenresultaten niet nagegaan.

Omdat NRG zowel een 2-dimensionaal als een (een factor 3 grover) 3-dimensionaal model voor het DEBORA-2 heeft gebruikt, kan uit de goede overeenkomst tussen beide worden afgeleid dat de rekennauwkeurigheid binnen het rekendomein goed was. Daarom kunnen alleen de omvang van het rekendomein en de opgelegde randvoorwaarden onderwerp van discussie zijn.

In tabel 4 zijn de uitkomsten van de berekeningen van GRS, UPC en NRG ten opzichte van de experimentele metingen samengevat. Hieruit moge duidelijk zijn dat, naast verschillen in stijfheid van het experimentele zoutgruis door uitdroging, numerieke effecten (GRS, UPC - DEBORA-1: numerieke stijfheid, NRG: randcondities) niet uit te sluiten zijn.

tabel 4 Vergelijking modelberekeningen en experimentele metingen

	Metingen	GRS	UPC		NRG
	vermogen:	100 %	100%	83%	75%
<u>DEBORA-1</u>	temperatuur	30 °C te hoog	30 °C te hoog	10 °C te laag	10 °C te laag
convergentie	28%	33%	35%	32%	30%
rad. spanning	12 - 15 MPa	(1 - 3 mnd te snel) 3 MPa te hoog	(veel te snel) 3 MPa te hoog	(iets te snel) 3 MPa te laag	(ongeveer goed) 8 MPa te laag
<u>DEBORA-2</u>	temperatuur	10 °C te hoog	10 °C te hoog		10 °C te hoog
convergentie	13%	17%	18%		18%
rad. spanning	6 - 16 MPa	(te snel) 3 MPa te hoog	(te snel) ongeveer goed		(te snel) 6 MPa te laag



## 5.2 500-m vrije-convergentie experiment

De metingen in het 500-m vrije-convergentie experiment waren vooral bedoeld voor de in-situ bepaling van het (stationaire en transiënte) kruipgedrag van steenzout. Hiertoe is aangenomen dat het constitutieve gedrag voor kruip van steenzout wordt beschreven door een Norton wet:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \dot{\epsilon}_{eq}^{cr} \cdot \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}} \quad \dot{\epsilon}_{eq}^{cr} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{ref}} \right)^n \quad \sigma_{eq} = \sqrt{3} J_2 \quad J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ji}$$

waarin:

$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr}$	tensor <i>ware</i> kruiprek tempo	$\sigma_{ref}$	referentie <i>ware</i> equivalente spanning [1 MPa]
$\dot{\epsilon}_{eq}^{cr}$	equivalente <i>ware</i> kruiprek tempo	$Q$	kruip activatie energie [J·mol <sup>-1</sup> ]
$S_{ij}$	deviatorische spanningstensor	$R$	universele gasconstante [8.3143 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
$A$	materiaal specifieke kruipcoëfficiënt [s <sup>-1</sup> ]	$T$	absolute temperatuur [K]
$\sigma_{eq}$	<i>ware</i> equivalente spanning [MPa]	$n$	materiaal specifieke kruipexponent

Gebaseerd op de aanname dat in steenzout de totale *ware* rek geschreven kan worden als de som van elastische, thermische en kruiprek is een beschrijving van de genormaliseerde convergentie van een boorgat ontwikkeld [27]. Daartoe is de convergentie genormaliseerd ten opzichte van de initiële elastische rek van het boorgat en de tijd ten opzichte van een karakteristieke tijdconstante (zie bijvoorbeeld [28] waar  $\nu = 0.5$  was aangenomen):

$$\bar{u} = \frac{u}{u_{el}} \quad u_{el} = -(2 - \nu) \frac{p}{E} r_{init}$$

$$\tau = \frac{t}{t^*} \quad t^* = \frac{2}{3} (1 + \nu) \frac{\sigma_{ref}}{E} \left( A e^{-\frac{Q}{RT}} \left( \sqrt{3} \frac{p}{\sigma_{ref}} \right)^{n-1} \right)^{-1}$$

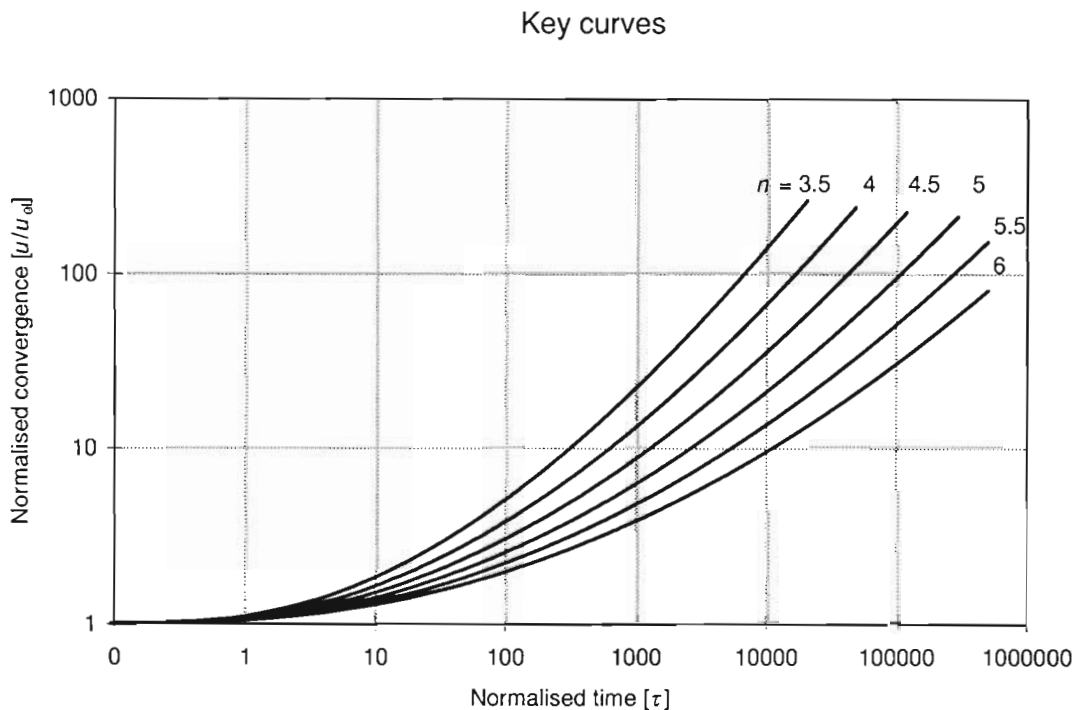
waarin:

$\bar{u}$	genormaliseerde convergentie	$E$	Young's modulus
$u$	actuele convergentie	$\nu$	Poisson's modulus
$u_{el}$	initiële radiale rek	$\tau$	genormaliseerde tijd
$p$	gesteentedruk	$t$	actuele tijd
$r_{init}$	initiële boorgatstraal	$t^*$	karakteristieke tijd

Voor gegeven waarden van  $Q$ ,  $E$  en  $\nu$  is de genormaliseerde convergentie slechts een functie van de kruipexponent  $n$  en de genormaliseerde tijd  $\tau$  [28]. Dat betekent dat op basis van een enkele genormaliseerde convergentiekromme bij gegeven kruipexponent  $n$  de werkelijke convergentie kan worden bepaald voor willekeurige waarden van de gesteentedruk en van de elastische, geometrische en kruipparameters.

In [28] werden de meest waarschijnlijke waarden van  $E$  en  $\nu$  voor Assezout bepaald als:  $E = 22.4$  GPa en  $\nu = 0.3$ . Met deze waarden werd op basis van 800 meetdagen in een in 1979 geboord 300 m diep boorgat vlak bij het 500-m boorgat de best-fit waarde voor  $Q$  bepaald als  $Q = 54.0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  [23]. Deze parameterwaarden zijn vrijwel gelijk aan de waarden die bepaald zijn op basis van laboratoriumexperimenten, die ook in de CS<sup>2</sup> benchmark werden gebruikt:  $E = 25$  GPa,  $\nu = 0.27$  en  $Q = 54 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  (zie hoofdstuk 2.3).

Op basis van de boven beschreven genormaliseerd convergentiemodel en de best-fit parameterwaarden voor  $E$ ,  $\nu$  en  $Q$  zijn voor een groot aantal kruipexponent waarden  $n$  zogenoemde *key curves* bepaald. Enkele van deze *key curves* zijn geschetst in figuur 12.



figuur 12 Genormaliseerde convergentiekrommen

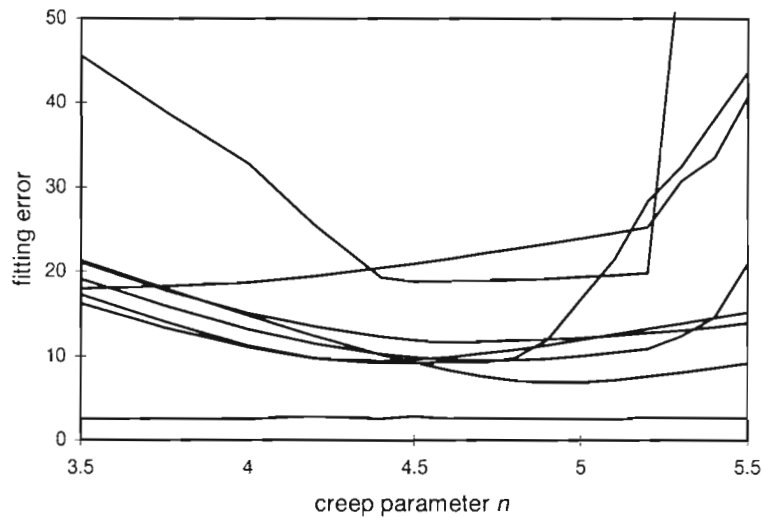
Aangenomen is dat de initiële spanningstoestand op de bodem van het boorgat gelijk is aan

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} p, \quad p = 26.06 \text{ MPa}, \text{ de gesteentedruk op de bodem van het boorgat}$$

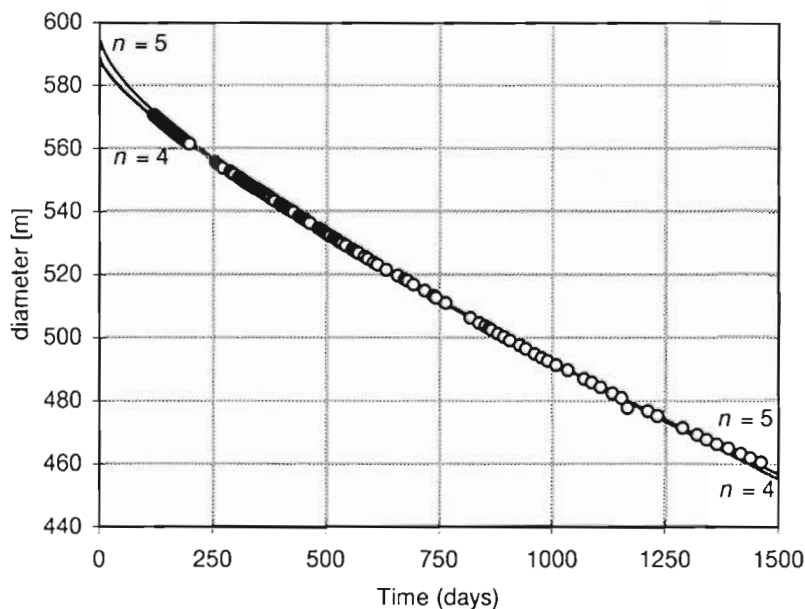
Om de best-fit waarde voor de kruipexponent  $n$  te bepalen is, op basis van de meetresultaten van de 8 diameteropnemers op de meetunit op de bodem van het boorgat tot meer dan 1450 dagen na het boren van het boorgat, de volgende fit-fout geminimaliseerd voor de kruipcoëfficiënt  $A$  en de boorgatdiameter  $D_{\text{mit}}$  (vrijheidsgraad om te corrigeren voor ruwheid van de boorgatwand en het effect van primaire kruip):

$$\sum_i (D_{\text{meas}}(t_i) - D_{\text{mit}} + 2\Delta r^{\text{el}}(t_i) + 2\Delta r^{\text{cr}}(t_i))^2$$

De grootte van deze fit-fout voor de best-fit waarden voor  $A$  en  $D_{init}$  is geschetst in figuur 13. Uit deze figuur blijkt dat een waarde voor de kruipexponent  $n = 5$  een redelijke keuze is<sup>4</sup>. Bij deze waarde van de kruipexponent horen de best-fit waarden  $A = 7.4 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  (op basis van de gemeten temperatuur van  $44.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en  $D_{init} = 598.975 \text{ mm}$  (bijna gelijk aan de initiële diameter van  $600 \text{ mm}$ ).



figuur 13 Fit-fout voor de 8 opnemers als functie van kruipexponent  $n$  (1450 dagen)



figuur 14 Metingen en best-fit berekeningen van de boorgatdiameter op 1230 m diepte

<sup>4</sup> Voor kortere meetperioden werden andere 'beste' waarden gevonden voor de kruipexponent  $n$ . Zo was bij een meetperiode van 180 dagen  $n = 4.4$  de 'beste' waarde, bij 400 dagen  $n = 5.0$  en tot 1200 dagen was  $n = 4.0$  ook nog een goede keuze (zie ook figuur 14).

De hier bepaalde waarde voor de kruipexponent  $n$  is een effectieve waarde die de effecten van zowel stationaire als transiënte kruip omvat. In figuur 14 is te zien dat de best-fit krommen zich vooral onderscheiden in de eerste kruipperiode tot ongeveer 200 dagen na het boren van het boorgat: kleinere waarden van de kruipexponent  $n$  worden daarbij gecompenseerd door kleinere waarden voor de effectieve initiële diameter  $D_{\text{init}}$  van het boorgat. Omdat het boren op de meetdiepte was gestopt wegens problemen met het boren op die diepte zou de initiële boorgatdiameter eerder groter dan kleiner dan de beoogde 600 mm zijn geweest. Daarom moet de waarde van de kruipexponent  $n = 5$  geprefereerd worden boven niet-uit-te-sluiten lagere waarden, een waarde die overigens ook uit laboratoriummetingen aan steenzout werd afgeleid.

De waarde van de best-fit waarde van de kruipcoëfficiënt  $A$  is mede afhankelijk van de temperatuur. De temperaturen zijn gemeten op de meetunits in het midden van het boorgat (zie tabel 5). Opvallend aan de meetwaarden is de geringe temperatuursgradiënt in het boorgat: in de onderste 200 m van het boorgat bedroeg deze slechts 1.25 °C per 100 meter terwijl in andere delen van de mijn een gemiddelde temperatuursgradiënt van 2.6 °C per 100 meter gebruikelijk is. Omdat de thermometers alleen de luchttemperatuur hebben gemeten valt niet uit te sluiten dat deze verschilt van de temperatuur van het omliggende steenzout: er is slechts een geringe convectieve stroming in het boorgat (langs de warmere wanden omhoog door het midden omlaag) nodig om al enkele graden verschil tussen de lucht in het centrum van het boorgat en het omringende steenzout te veroorzaken. Daarom zijn in tabel 5 ook gecorrigeerde temperaturen gegeven die gebaseerd zijn op gemiddelde temperatuursgradiënt van 2.6 °C per 100 meter.

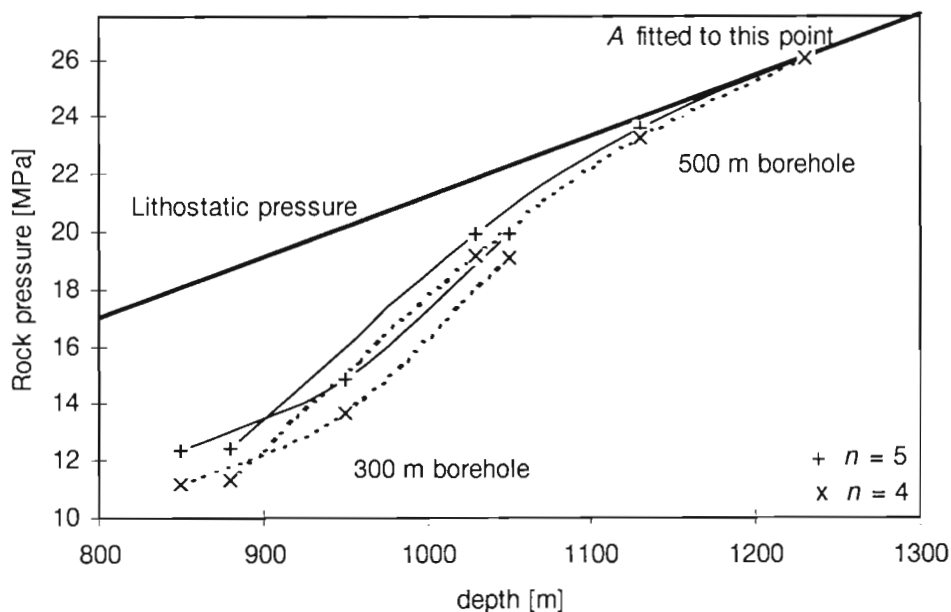
tabel 5 Temperaturen als functie van de diepte in het 500-m boorgat

Meetdiepte [m]	Gemeten temperatuur [°C]	Gecorrigeerde temperatuur [°C]
880	38,4 *)	38,4
1030	42,3	42,3
1130	43,6	44,9
1230	44,8	47,5

\*) Elders gemeten waarde (thermometer was defect)

Met behulp van de gecorrigeerde temperatuur onder in het boorgat wordt de best-fit waarde van de kruipcoëfficiënt  $A = 6.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . Deze waarde is een factor 3 groter dan de gemiddelde waarde die met behulp van relatief kortdurende laboratorium kruipexperimenten (alleen secundaire kruip!) met steenzout uit de Assemijn is bepaald en die ook in de CS<sup>2</sup> benchmark was gebruikt. De range van de kruipcoëfficiënt  $A$  bepaald uit laboratoriumexperimenten bedraagt echter wel een factor 30.

Op basis van de convergentiemetingen op de andere meetdiepten in het 500-m boorgat kan door gebruik te maken van de best-fit waarden voor de parameters  $A$  en  $n$  een schatting gemaakt worden van de gesteentedruk ter plaatse. In figuur 15 is de met deze methode bepaalde gesteentedruk geschetst.



figuur 15 Gesteentedruk als functie van de diepte gebaseerd op best-fit parameters voor  $A$  en  $n$

Deze figuur toont ook data die gebaseerd zijn op de metingen in één van de eerdere 300-m boorgaten [24]. De afwijking van de lithostatische druk wordt veroorzaakt door de invloed van het grote ten behoeve van de zoutproductie uitgegraven volume van de Assemijn. Gebaseerd op de curven in figuur 15 ligt de gesteentedruk rond het HAW onderzoeksveld op het 800-m niveau van de Assemijn rond 10 tot 12 MPa.

In [29] was afgeleid dat voor een cilindrische ruimte de invloed van de werkelijke vorm zich uitstrekt tot ca. 6 keer de straal van de cilinder. Voor het zoutproductie volume in de Assemijn (ruwweg een blok van 250 m hoog, 600 m breed en 50 m diep) is dit invloedgebied niet exact bekend – waarschijnlijk tot op ca. 500 m van het uitgemijnde volume. Het in het 500-m vrije-convergentie experiment bepaalde gesteentedrukverloop als functie van de diepte (figuur 15) heeft deze schatting bevestigd.



## 6 Evaluatie en conclusies

In dit hoofdstuk wordt het BAMBUS project geëvalueerd, onderscheiden naar de gezamenlijke doelen van het project en de specifiek Nederlandse bijdrage daaraan. Op basis van de ervaringen in het BAMBUS project worden in paragraaf 6.2 enige conclusies getrokken.

### 6.1 Evaluatie

#### 6.1.1 BAMBUS project algemeen

##### Doelen

Als de resultaten van het BAMBUS project naast de tevoren gedefinieerde algemene doelen worden gezet (paragraaf 1.2), dan kan alleen maar geconcludeerd worden dat deze geheel zijn gehaald:

- de set meetdata voor de relevante verschijnselen en processen in nagevulde opslaggaleries en boorgaten is behoorlijk vergroot;
- de kennis die nodig is voor het ontwerp en beoordeling van het gedrag van dergelijke opslagfaciliteiten is daardoor zeker toegenomen; en
- de bestaande thermo-mechanische modellen voor de voorspelling van het lange-termijn gedrag van een dergelijke opslagfaciliteit zijn stevig aan elkaar en grote in-situ experimenten getest en bijgesteld.

Nader kijkend naar de specifieke doelen van de verschillende werkpakketten kunnen ook hierbij hooguit slechts kleine afwijkingen van de doelen worden geconstateerd:

- WP1 De in-situ experimenten die voorzien waren zijn alle succesvol uitgevoerd of voortgezet. Hoewel verschillende experimenten met diverse tegenvallers te kampen hadden, zijn de meetresultaten goed bruikbaar gebleken.
- WP2 De laboratoriumexperimenten op zoutgruis hebben een brede database opgeleverd waarmee de relaties tussen verschillende eigenschappen van zoutgruis goed onderbouwd zijn (zie paragraaf 2.2.3).
- WP3 De modelbenchmark voor zoutgruismodellen heeft alle deelnemers een verbeterd model opgeleverd. Slechts het ultieme doel van de benchmark - het volledig modelleren van het TSDE experiment - bleek met de beschikbare programma's nog net een stap te ver.
- WP4 Verschillende partners hebben met het doel hun programma's te valideren de diverse in-situ experimenten gemodelleerd die uitgevoerd zijn in het BAMBUS project. Helaas ontbrak tegen het eind van het project de tijd om de geconstateerde verschillen nader te analyseren.

##### Resultaten

De belangrijkste resultaten van het BAMBUS project zijn samengevat te vinden in hoofdstuk 2 van dit rapport. Uit de ervaringen opgedaan in het BAMBUS project kunnen ook een aantal leringen worden getrokken.

### *In-situ convergentie langzamer dan verwacht*

Uit de uitgevoerde in-situ experimenten is gebleken dat de compactie van als navulling gebruikt zoutgruis in galerijen en boorgaten langzamer verloopt dan eerder was aangenomen. De laagste waarde van de porositeit die bereikt werd was 9% (DEBORA-1), terwijl de verdere compactie bij die porositeit dermate langzaam verloopt dat geconstateerd moet worden dat de relevant lagere waarden van de porositeit die voor barrières in een opslagfaciliteit in steenzout nodig zijn in in-situ experimenten niet binnen overzienbare tijd bereikt kunnen worden. Daaruit moet geconstateerd worden dat voor het onderzoek naar het eind-traject van compactie van zoutgruis naar massief steenzout laboratoriumexperimenten een belangrijke rol zullen blijven spelen.

Voor de geconstateerde afwijking van het in-situ compactiegedrag ten opzichte van de verwachting kunnen allerlei redenen worden aangevoerd, zoals:

- een afwijkende gesteentedruk als gevolg van het uitmijnen van het volume voor vroegere zoutproductie in de Assemijn;
- invloeden van de heterogeniteit van eigenschappen van het steenzout in de Assemijn die tot nog toe onvoldoende in de modellen voor het constitutief gedrag van steenzout zijn verdisconteerd;
- een te kleine afmeting van het experiment vergeleken met de uiteindelijke omvang van een faciliteit, waardoor allerlei wezenlijk 3-dimensionale effecten gaan meespelen die op de schaal van galerijen en boorgaten in een echte faciliteit geen rol van betekenis zullen spelen.

### *Compactietests in verschillende laboratoria moeilijk vergelijkbaar*

Uit vergelijkingen tussen tests uitgevoerd in verschillende laboratoria kwam naar voren dat resultaten van diverse zoutgruis compactietests moeilijk van het ene naar het andere laboratorium te vertalen waren. Dit werd met name duidelijk toen, in het kader van de CS<sup>2</sup> benchmark, werd gepoogd een compactietest met een voorgeschreven belastingspatroon in drie laboratoria uit te voeren. Een groot deel van de verschillen is waarschijnlijk terug te voeren op de bereiding van het test-sample, maar ook de vaststelling van de 'initiële' porositeit van het sample bleek een lastige opgave. Daarnaast speelden allerlei - in principe te verdisconteren - verschillen tussen de test apparatuur een rol.

Het is gebleken dat compactietests uitgevoerd met een kubische tri-axiaaltestcel (FZK) de meest betrouwbare uitkomsten geven. Tests uitgevoerd in oedometeropstellingen hebben vaak te maken met moeilijk te voorkomen wandfrictie. In een kubische tri-axiaalcel is deze frictie met eenvoudige middelen in grote mate te verminderen.



## **Nader onderzoek**

Uit vergelijking van experimenten en modelberekeningen kwamen een aantal onderwerpen voor nader onderzoek naar voren.

### *Inhomogene compactie van zoutgruis*

Uit metingen uitgevoerd in het TSDE experiment - maar ook in het laboratorium - kan afgeleid worden dat in een met zoutgruis nagevulde opslagkamer inhomogene compactie daarvan kan optreden. Op basis van de huidige (homogene) deviatorische modellen kon al berekend worden dat effecten van de temperatuurgradiënt in het zoutgruis zal leiden tot inhomogene compactie ten gevolge van de zoutgruiseigenschappen. Dit wordt nog versterkt door de 'schilfer'-vorm van de zoutgruis korrels die bij een dergelijke opslag als navulling worden gebruikt: dit zoutgruis is afkomstig van uitgravingen met een roadheader die het zout als het ware schaافت. Bij storten van dit zoutgruis hebben de deeltjes de neiging 'plat' te gaan liggen, wat heterogeniteit in het compactieproces veroorzaakt. Verder zijn er duidelijke aanwijzingen dat de wijze van inbrengen van het als navulling gebruikte zoutgruis (zo realistisch mogelijk: door slinger trucks) mogelijk een scheiding van grove en fijne zoutdeeltjes tot gevolg kan hebben gehad die de inhomogeniteit van het zoutgruis nog zou hebben versterkt. De relevantie van de inhomogeniteit van de zoutgruis navulling voor de ontwikkeling van de veiligheid van een opslagfaciliteit in steenzout verdient nader onderzoek.

### *Invloed vochtgehalte zoutgruis*

Uit de literatuur (zie bijvoorbeeld [8], [12]) is bekend dat de hoeveelheid vocht in zoutgruis een belangrijk effect kan hebben op het compactiegedrag ervan. In het DEBORA-1 experiment is gebleken dat door verhitting van het daarin als navulling gebruikte zoutgruis voldoende vocht vrijkwam om de voor de meting van annulusbreedte gebruikte instrumenten inwendig te corroderen. Om dit in het DEBORA-2 experiment te voorkomen is daarin het zoutgruisvolume continu met droge stikstof gespoeld. Verder blijkt uit vergelijking van het gedrag van het DEBORA-2 experiment met de voor dit experiment uitgevoerde thermo-mechanische analyses dat het zoutgruisgedrag stijver was dan op grond van de voorafgaande bepaling van de eigenschappen werd verwacht. Hieruit moge duidelijk zijn:

- dat het vochtgehalte van zoutgruis een expliciet onderdeel zou moeten uitmaken van een beschrijving van het constitutief gedrag van zoutgruis, en
- dat (de ontwikkeling van) het vochtgehalte van het als navulling gebruikte zoutgruis in een opslagfaciliteit een relevant onderdeel van een daarvoor uitgevoerde performance analyse zou moeten uitmaken.

De ontwikkeling van dergelijke modellen is een zaak voor nader onderzoek.

### *Snelle numerieke algoritmen voor 3-dimensionale thermo-mechanische berekeningen*

Uit de ervaringen opgedaan in de CS<sup>2</sup> model-benchmark (WP3) en de modelberekeningen uitgevoerd aan het TSDE experiment (WP4) is gebleken dat de beschikbare programma's voor het uitvoeren van 3-dimensionale thermo-mechanische berekeningen uit het oogpunt van rekentijd nog onvoldoende ontwikkeld zijn om de grootschalige 3-dimensionale berekeningen rond een opslagfaciliteit voor warmteproducerend radioactief afval in steenzout te kunnen uitvoeren. In de CS2 benchmark zowel als in de modellering van het TSDE experiment moest uiteindelijk worden teruggegrepen naar 2-dimensionale modelbenaderingen, die aantoonbaar het in werkelijkheid 3-dimensionale kruipgedrag van het omringende steenzout onjuist simuleerden.

Ondanks de voortschrijdende toename van de rekensnelheid van beschikbaar komende computers, blijft de ontwikkeling van snelle algoritmen voor de programma's voor 3-dimensionale thermo-mechanische berekeningen noodzakelijk om meer dan globale analyses te kunnen uitvoeren.

### 6.1.2 Nederlandse bijdrage

In het BAMBUS project is bijgedragen aan de ontwikkeling en uitvoering van beide DEBORA in-situ experimenten, en werd het 500-m vrije-convergentie experiment succesvol beëindigd. Deelname aan de CS<sup>2</sup> model-benchmark heeft een goed gevalideerd model voor het constitutief gedrag van ‘droog’ zoutgruis opgeleverd, dat succesvol kon worden toegepast voor modelberekeningen aan beide in het BAMBUS project uitgevoerde DEBORA experimenten.

#### **DEBORA experimenten**

In het BAMBUS project werd onder regie van NRG de instrumentatie van beide DEBORA experimenten gebouwd en geplaatst. De uitvoering van de experimenten werd door GRS gedaan. Ervaringen opgedaan met de instrumentatie in het DEBORA-1 experiment werden succesvol gebruikt ter verbetering van de (bescherming van) vergelijkbare instrumentatie in het DEBORA-2 experiment.

Hoewel de meetresultaten van het DEBORA-1 onderzoek niet aan de verwachting voldeden door deels falen van de instrumentatie, bleek het mogelijk te zijn de belangrijkste meetresultaten (breedte van de met zoutgruis nagevulde annulus) met redelijk succes uit de ruwe meetdata te reconstrueren (zie paragraaf 3.1.4), zoals ook door het post-test onderzoek van het DEBORA-1 experiment is aangetoond. De instrumentatie van het DEBORA-2 experiment voldeed (vrijwel) volledig aan de verwachtingen en behoefde nauwelijks enige herinterpretatie. De afwijking van de meetresultaten van de drukopnemers in beide DEBORA experimenten ten opzichte van de verwachtingen kon door GRS middels een kalibratietest in een oedometer worden gecorrigeerd (zie paragraaf 3.1.5).

#### **500-m vrije-convergentie experiment**

De meetapparatuur op de meetunits in het al in 1994 begonnen vrije-convergentie experiment in een 500 m diep boorgat vanaf het 750 m niveau in de Assemijn (het ‘gat van Nederland’) heeft tot aan de beëindiging van het experiment in het voorjaar van 1998 vlekkeloos gefunctioneerd. Omdat de bodem-meetunit dreigde klem te komen zitten werd besloten de zo succesvol gebleken meetinstrumenten te ‘redderen’ om deze later eventueel te kunnen hergebruiken. Op wat (zout)stof na bleek de instrumentatie in zeer goede staat te verkeren. In afwachting van eventueel later hergebruik is de instrumentatie opgeslagen in de Assemijn vlak bij het 500 m diepe boorgat.

#### **Model voor gedrag ‘droog’ zoutgruis**

Dankzij de deelname aan de CS<sup>2</sup> model-benchmark in WP3 van het BAMBUS project is een model ontwikkeld voor het constitutief gedrag van ‘droog’ zoutgruis, de ‘normale’ toestand voor zoutgruis gebruikt als navulling in een faciliteit voor opslag van warmteproducerend radioactief afval in steenzout. Het ontwikkelde model is uitgebreid gevalideerd aan de serie problemen die in het kader van de CS<sup>2</sup> model-benchmark waren gedefinieerd. Daarnaast kon het model ook op zijn merites worden beoordeeld door toepassing in eindige elementen-modellen voor beide in het BAMBUS project uitgevoerde DEBORA-projecten.

### 6.1.3 Toepassingen in andere CORA projecten

De toepassing van de kennis verkregen door het deelnemen en uitvoeren van werkzaamheden in het BAMBUS project in andere CORA projecten is beperkt gebleven tot twee studies waarin inleidend onderzoek werd gedaan naar de invloed op de veiligheid van de door de Nederlandse overheid geformuleerde terughaalbaarheidseis voor de opslag van hoog-toxisch (radioactief) afval:

- PASTA project [3], waarin de terughaalbare directe opslag van brandstofstaven uit de Nederlandse onderzoeksreactoren werd onderzocht, toegespitst op een opslagfaciliteit in steenzout (METRO-I concept) en een in klei (TRUCK-II concept). In dit project zijn onder meer enige berekeningen gewijd aan de lange-termijn veiligheidsaspecten van deze concept-faciliteiten. Bij de berekeningen voor de METRO-I faciliteit in steenzout is gebruik gemaakt van de transportmodellen ontwikkeld in het METRO-III project [4].
- METRO-III project [4], waarin modelontwikkeling is uitgevoerd die nodig is voor de beschrijving van vrijzettingsscenario's en de processen die zich in deze scenario's voordoen. In die studie is onder meer dankbaar gebruik gemaakt van de permeabiliteit-porositeit relatie zoals die is vastgesteld in het BAMBUS project (paragraaf 2.2.2) als referentiecurve voor de ontwikkeling van een algemene permeabiliteit-porositeit relatie op basis van percolatietheorie, waarmee het bestaan van een drempelwaarde voor de porositeit (ca. 1%) is verklaard onder welke gecompacteerd zoutgruis ondoorlatend wordt.

Het in het BAMBUS project ontwikkelde model voor de compactie van *droog* zoutgruis heeft in de METRO-III studie slechts een ondergeschikte rol gespeeld omdat daarin - voor wat betreft de METRO-I faciliteit in steenzout - de nadruk lag op het zogenoemde 'verwaarlozingsscenario', waarbij deze faciliteit volloopt met grondwater en het dan *natte* nagevulde zoutgruis ten gevolge van het dan optredende proces van Fluid Assisted Diffusional Transport (FADT) [8] veel minder weerstand biedt tegen compactie. Het in paragraaf 6.1.1 genoemde mogelijk toekomstig nader onderzoek naar de invloed van het vochtgehalte van zoutgruis op het compactiegedrag biedt in dit opzicht waarschijnlijk meer relevante uitkomsten.

## **6.2 Conclusies**

Uit het BAMBUS project kunnen een aantal conclusies getrokken worden die voor toekomstige soortgelijke projecten van belang zijn.

### **Vruchtbare kruisbestuiving experimentatoren en modellers**

Terugkijkend naar de uitvoering het BAMBUS project kan geconstateerd worden dat de gekozen combinatie van experimenteren (WP1 en WP2) en modelleren (WP3 en WP4) een zeer geslaagde is. Zowel via de halfjaarlijkse bijeenkomsten van de Technische Commissie als ook in de werkzaamheden in de werkpakketten zelf bestond er regelmatig een intensief contact tussen experimentatoren en modellers die tot een gezonde kruisbestuiving heeft geleid.

### **In-situ experimenten naast laboratoriumexperimenten**

Ook in het BAMBUS project is weer gebleken dat voor het onderzoek naar het veiligheidsgedrag van een opslagfaciliteit voor warmteproducerend radioactief afval in steenzout in-situ experimenten onmisbaar zijn. Hoewel de detailsamenhang tussen processen heel goed in laboratoriumexperimenten kan worden onderzocht, waren onverwachte resultaten uit de in-situ experimenten toch steeds de aanleiding tot nader onderzoek in het laboratorium. Alleen al het schaalverschil tussen een opslagfaciliteit en de grootte van laboratorium testfaciliteiten maakt duidelijk dat grootschaliger wisselwerking tussen processen niet in het laboratorium 'ontdekt' kan worden.

### **Post-test onderzoek van in-situ experimenten**

Uit het binnen het BAMBUS project uitgevoerde post-test onderzoek aan het DEBORA-1 experiment - evenals uit het daarna door GRS nog uitgevoerde post-test onderzoek aan het DEBORA-2 experiment - is gebleken dat dit soort onderzoek een eigenlijk onmisbaar onderdeel zou moeten zijn van elk in-situ onderzoeksproject. Dit onderzoek levert vaak de verklaringen voor niet-begrepen meetresultaten en kan tevens dienen als validatie door controle van de eindtoestand van het experiment en na-kalibratie van de gebruikte meetinstrumenten.

### **Internationale samenwerking is onmisbaar**

Voor de kennisopbouw nodig voor de ontwikkeling van een veilige opslagfaciliteit van warmteproducerend radioactief afval in steenzout is internationale samenwerking een 'must'. De groep wetenschappers die in de Europese landen zich met deze problematiek bezighoudt is tamelijk klein, zodat alleen in internationale samenwerking grootschaliger onderzoek kan worden uitgevoerd. Verder is het benodigde in-situ onderzoek tamelijk duur waardoor, in een tijd waarin de publieke opinie met betrekking tot het radioactief afval verdeeld is, de voor een nationale 'Alleingang' benodigde uitgaven door nationale overheden moeilijk politiek te verdedigen zijn.

### **Onderwerpen voor nader onderzoek**

Uit het BAMBUS project zijn een paar onderwerpen naar voren gekomen die in toekomstige projecten nader onderzoek verdienen voor de onderbouwing van beschouwingen over de veiligheidsontwikkeling van een opslagfaciliteit voor warmteproducerend radioactief afval in steenzout:

- Invloed van inhomogene compactie van als navulling gebruikt zoutgruis;
- Invloed van het vochtgehalte van als navulling gebruikt zoutgruis.

Verder is bij de pogingen het TSDE experiment numeriek te modelleren gebleken dat de beschikbare programma's voor thermo-mechanische analyses uit oogpunt van rekentijd voorlopig nog ongeschikt zijn om de voor veiligheidsanalyses benodigde grootschalige 3-dimensionale berekeningen te kunnen uitvoeren, zodat het voor de modellering van de kruip van steenzout rond een opslagfaciliteit voor warmteproducerend radioactief afval in steenzout nodig zal zijn:

- snelle numerieke algoritmen te ontwikkelen voor 3-dimensionale thermo-mechanische berekeningen.

## Referenties

- [1] W. Bechthold, T. Rothfuchs, A. Poley, M. Ghoreychi, S. Heusermann, A. Gens, S. Olivella: *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)*, EUR 19124 EN, CEC, (1999)
- [2] T. Rothfuchs, H.-K. Feddersen, K.-P. Kröhn, R. Miehe, K. Wieczorek (contrib. of A. Poley): *The DEBORA-project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II. Final Report*, GRS-161, December 1999
- [3] D.H. Dodd, J.B. Grupa, M. Houkema, J.B.M. de Haas, Th. van der Kaa, A.C. Veltkamp: *Direct disposal of spent fuel from test and research reactors in the Netherlands – A Preliminary Investigation*. 21406/00.30934/P, January 2000
- [4] J.B. Grupa, M. Houkema: *Terughaalbare opberging van radioactief afval in diepe zout- en kleiformaties – Modellen voor een veiligheidsstudie*. 21082/00.33017/P (nog te publiceren)
- [5] L. Liedtke, W. Bleich: *Stoffverhalten von Salzgrus*. Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung, Abschlußbericht Fachband 11, Berlin (1985) 2 - 1
- [6] M. Ghoreychi, P. Habib: *Comportement mécanique a court du sel broyé*. Rapport semestriel No 2, Contract No FI 1W/060, CEC, 1987
- [7] E. Korthaus: *Consolidation and deviatoric deformation behaviour of dry crushed salt at temperatures up to 150 °C*. Proc. 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, 1996
- [8] C.J. Spiers, C.J. Peach, R.H. Breskowsky, P.M.T.M. Schutjens, J.L. Liezenberg, H.J. Zwart: *Long-Term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt Rocks*. EUR 11848 EN, CEC, Luxembourg, 1988
- [9] H.J. Hein: *Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat*. Thesis, RWTH Aachen, 1991
- [10] S. Olivella, A. Gens, E.E. Alonso, J. Carrera: *Constitutive modelling of porous salt aggregates*. Numerical Models in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, 1992
- [11] C.L. Zhang, U. Heemann, M.W. Schmidt, G. Staupendahl: *Constitutive model for description of compaction behaviour of crushed salt backfill*. Proc. ISRM International Symposium, EUROCK, Lisbon, 1993
- [12] G.D. Callahan, M.C. Loken, L.L. van Sambeek, R. Chen, T.W. Pfeifle, J.D. Nieland, F.D. Hansen: *Evaluation of Potential Crushed-Salt Constitutive Models*. SAND95-2143, Albuquerque, 1995
- [13] F. Walter: *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von verfestigtem Salzgrus*. GSF/IfT, 1989
- [14] D. Stührenberg, C.L. Zhang: *Results of experiments on the compaction and permeability behaviour of crushed salt*. Proc. 5<sup>th</sup> Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Berlin, 1995
- [15] E. Fein, I. Müller-Lyda, R. Storck: *Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien*. GRS-132, Braunschweig, 1996

- [16] W. Bechthold, S. Heusermann, W. Bollingerfehr, F. Mantee, E. Korthaus, A. Pudewills, J. Droste, T. Rothfuchs, E. Smailos: *Thermal Simulation of Drift Emplacement. Summary of Interim Results*. FZKA-PTE Nr. 4, Forschungszentrum Karlsruhe, 1997
- [17] T. Rothfuchs, J. Prij, K.-P. Kröhn, B.A. van den Horn, K. Wieczorek: *The DEBORA-Project Phase I: Development of the Borehole Seals for high-Level Radioactive Waste Repositories in Salt Formations, Final Report*. EUR 16928 EN, CEC, Brussels, 1996
- [18] P. Ploumen: *Numerische Langzeitrechnung dreidimensionaler Temperaturfelder mit Hilfe eines speziellen Finite-Element-Verfahrens am Beispiel der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salzgestein*. Thesis, RWTH Aachen, 1980
- [19] G. Albers: *MAUS – A Computer Code for Modelling Thermomechanical Stresses in Rocksalt*. Proc. Technical Session, EUR 9355 EN, Brussels, 1983
- [20] A. Pudewills, N. Müller-Hoeppe, R. Papp: *Thermal and thermomechanical analyses for disposal in drifts of a repository in rock salt*. Nuclear Technology, 112 (1994) 79
- [21] S. Olivella, A. Gens, J. Carrera, E.E. Alonso: *Numerical formulation for a simulator (CODE\_BRIGTH) for the coupled analysis of saline media*. Engineering Computations, Vol. 13 (7), p.87-112, 1996
- [22] N. Jockwer, T. Rothfuchs: *Investigations and modelling of fluid release from rock salt at elevated temperatures*. Proc. Workshop Testing and Modelling of Thermal, Mechanical and Hydrogeological Properties of Host Rocks for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. EUR 16219 EN, CEC, Brussels, p. 245, 1995
- [23] L.F.M. Hamilton, J. Prij, N. Jockwer: *Drilling surveillance and geomechanical experiments in deep boreholes in salt - Final report for contract FI1W/0084*. EUR 14235 EN, 1993
- [24] J.J. Heijdra, J.Prij: *Geomechanical measurements in a deep dry-drilled borehole in Asse II rock salt – Final report for contract FI2W-CT90-0050*. ECN-C—95-013, maart 1995
- [25] G.D. Callahan, L.D. Hurtado: *Evaluation of constitutive models for crushed salt*. Artikel gepresenteerd op de 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, juni 1996
- [26] G.D. Sjaardema, R.D. Krieg: *A Constitutive Model for the Consolidation of WIPP Crushed Salt and its Use in Analysis of Backfilled Shafts Configuration*. SAND87-1977. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1987
- [27] J. Prij, J.H.J. Mengelers: *On the derivation of a creep law from isothermal bore hole closure*. ECN-89, 1981
- [28] J. Prij: *On the design of a radioactive waste repository*. Ph.D. Thesis, University of Twente, 1991
- [29] C.J.J. Beemsterboer, J. Prij: *Influence of a gallery on the stresses in the surrounding rock salt*. ECN-C—93-007, 1993