Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De catalogus van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde tijdschriften uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling video's.

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material.
Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The catalogue of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized magazines from the Dutch anti-nuclear power movement and a video-section.

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small donation. Thank you.

www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

Rijks Geologische Dienst **RGD**

Evaluatie van Nederlandse zoutvoorkomens en hun nevengesteente voor de berging van radioactief afval

Overzicht van de resultaten

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2018

Ministerie van Economische Zaken

Evaluatie van de Nederlandse zoutvoorkomens en hun nevengesteente voor de berging van radioactief afval

Overzicht van de resultaten

Auteurs:
A.F.B. Wildenborg
M.C. Geluk
Th.A.M. de Groot
G. Remmelts
G.Th. Klaver
A.N.M. Obdam
A. Ruizendaal
P.J.T. Steins

Dit deel behoort tot de volgende reeks:
Overzicht van de resultaten
a. Spatial data
b. Salt movement
c. Caprock formation and subrosion
d. Fluvial and subglacial erosion
e. Geological barrier model
(delen a. tot en met e. in de Engelse taal)

Eindrapport van geologisch onderzoek in het project GEO-1A, een onderdeel van het nationale Programma van Onderzoek OPLA, Fase 1A; rapport 30.012/ER
November 1993

Ministerie van Economische Zaken

Uitgebreide samenvatting

Inhoud

Plaats van het onderzoek bij de RGD in het OPLA Programma *V*

Korte beschrijving van het onderzoeksgebied *VI*

Raamwerk van het huidige project *VI*

De huidige toestand van de geologische barrières *VIII*
- **Onzekerheidsanalyse van geologische gegevens** *VIII*
- **Aanvullende inventarisatie van geologische gegevens** *IX*
- **De opzet van een computersysteem voor geologische gegevens** *IX*
- **Hydrogeologische kenmerken van Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren** *X*
- **Hydrogeologische karakteristieken van breuken** *XI*

Processen die de toekomstige toestand van de geologische barrières beïnvloeden *XI*
- **Zoutbeweging** *XI*
- Case studies van de structurele ontwikkeling van zoutstructuren *XI*
- Verfijning van de methoden voor de berekening van stijgsnelheden *XII*
- Modellering van zoutbeweging *XIII*
- Aspecten van de interne opbouw van zoutstructuren *XIII*
- **Caprock-vorming en zoutoplossing** *XIV*
- Case study van de opbouw en het ontstaan van caprock *XIV*
- Modellering van zoutoplossing *XIV*
- **Erosie door rivieren en onder ijskappen** *XV*
- Riviererosie in samenhang met bewegingen van zeespiegel en bodem *XV*
- Modellering van riviererosie *XV*
- Erosie onder ijskappen met de nadruk op de opbouw van de ondergrond *XVI*
- Modellering van erosie onder ijskappen *XVI*
- **Haalbaarheid van de toekomstige ontwikkeling van een geologisch barrièremodel** *XVI*
- Uitgangspunten voor de toekomstige ontwikkeling van een barrièremodel *XVI*
- Evaluatie van bestaande modellen *XVII*
- Haalbaarheid van een geologisch barrièremodel *XVIII*

Nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens *XVIII*
- **Inleiding** *XVIII*
- **Inventarisatie van de zoutvoorkomens** *XVIII*
- **Groepering op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen** *XIX*
- **Groepering op basis van de verwachte toekomstige geologische stabiliteit** *XX*

Collectie Stichting Loko
www.loko.org
Gedigitaliseerd 2018

Opbrengst voor de veiligheidsstudie *XX*

Conclusies en aanbevelingen *XX*
Conclusies betreffende de vaststelling van de onzekerheden *XX*
Conclusies betreffende de nadere groepering van zoutvoorkomens *XXII*
Aanbevelingen *XXII*

Plaats van het onderzoek bij de RGD in het OPLA Programma

Het onderzoek in het project GEO-1A, waarvan hier verslag uitgebracht wordt, maakt deel uit van Fase 1A van het nationale programma betreffende de geologische opberging van radioactief afval in de ondergrond van Nederland (het OPLA Programma). In 1984 diende de Commissie OPLA een voorstel in voor het uitvoeren van het meerfasige OPLA Programma. Het Parlement gaf vervolgens toestemming om over te gaan tot de uitvoering van de eerste fase van het programma van onderzoek. In 1989 bracht de Commissie OPLA het verslag van Fase 1 uit. De huidige Fase 1A is een voortzetting van Fase 1. In het voornoemde voorstel was een keuze gemaakt voor steenzout als het type opberggesteente waar de aandacht in eerste instantie naar zou uitgaan. Dit steenzout van Zechstein ouderdom is in grote massieve lichamen in de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland aanwezig.

Het hoofddoel van de geologische opberging van radioactief afval in de ondergrond is om dit afval van de mens en het milieu te isoleren voor zolang het afval bij vrijzetting nog onaanvaardbare risico's zou opleveren.
De analyse van het risico vindt plaats in de veiligheidsstudie, het centrale onderzoeksthema in het OPLA Programma. Een aantal meer gedetailleerde en gespecialiseerde studies behorende tot verschillende disciplines, ondersteunen de veiligheidsstudie. De disciplines zijn hydrologie, geologie, reologie en mijnbouwkunde.

In de veiligheidsstudie zijn drie systemen te onderscheiden, namelijk het barrièresysteem, het vloeistofsysteem en het radionuclidesysteem, die alle elkaar onderling kunnen beïnvloeden. Elke ondersteunende discipline heeft betrekking op een of twee van de drie systemen. Het aardwetenschappelijke onderzoek waarvan hier verslag uitgebracht wordt, heeft in het bijzonder betrekking op de natuurlijke toestand van de geologische barrières. Met een geologische barrière wordt hier een *in-situ* gesteente of sediment bedoeld dat in staat is om radionucliden te demobiliseren of de migratie van radionucliden te vertragen. Deze natuurlijke materialen worden gekenmerkt door een hoge sorptiecapaciteit en/of een lage doorlatendheid en porositeit.

De belangrijkste taak van de Rijks Geologische Dienst in het OPLA Programma is het beschrijven en voorspellen van de huidige dan wel de mogelijke toekomstige toestanden van de geologische barrières. De huidige toestand van de geologische barrières is direct af te leiden uit veldwaarnemingen (datastudies). In de voorspelling van de mogelijke toekomstige toestanden van de geologische barrières volgt de Dienst de volgende aanpak. De eerste stap bestaat uit het onderzoeken van de processen die de toestand van de barrières in het geologische verleden beïnvloedden (processtudies). Hierbij wordt ernaar gestreefd om alle bekende, relevante processen in het onderzoek te betrekken. Een eerste aanwijzing voor de mogelijke toekomstige ontwikkeling wordt gegeven door het extrapoleren van waargenomen effecten van processen in het verleden naar de toekomst. Echter, een waargenomen trend in het verleden hoeft niet *a priori* voortgezet te worden in de toekomst. De wetenschappelijke basis van prognoses voor de toekomst kan belangrijk verbeterd worden door een gedegen inzicht op te bouwen van de natuur- en scheikundige mechanismen van deze processen. Een beter begrip van de mechanismen kan worden verkregen door het uitvoeren van natuur- en scheikundige simulaties met behulp van de computer (modelstudies). Om dergelijke modelstudies tot een goed einde te brengen zijn geschikte veldgegevens noodzakelijk om de modeluitkomsten te toetsen. De ontwikkeling van dit type onderzoek staat momenteel nog in de kinderschoenen. Modelstudies dienen voor elk relevant proces afzonderlijk uitgevoerd te worden. In het bijzonder worden de geologische processen die direct op de omvang van de barrières ingrijpen, in ogenschouw genomen, te weten zoutbeweging, zoutoplossing (subrosie) en erosie.
Het centrale doel op de langere termijn in het geologische onderzoek binnen het OPLA Programma is de ontwikkeling van een geologisch barrièremodel dat geschikt is voor het voorspellen van het gezamenlijke effect van de processen op de toestand van de geologische barrières gedurende opeenvolgende perioden in de toekomst. Een dergelijk model wordt, om het hanteerbaar te houden voor de beschikbare computer capaciteit, gebaseerd op vereenvoudigde versies van de modellen voor

de afzonderlijke processen. Het barrièremodel is bedoeld ter ondersteuning of idealiter als een component van de veiligheidsstudie, in het bijzonder bij het onderscheiden en definiëren van de vrijzettingsscenario's.

Het doel van de eerste fase van het OPLA Programma is te bepalen of radioactief afval in principe veilig kan worden opgeborgen in zoutvoorkomens zoals die in de Nederlandse ondergrond aanwezig zijn. Het onderzoek in de eerste fase heeft een fundamenteel, generiek karakter waarbij veldonderzoek in Noord- en Oost-Nederland uitgesloten is. De gebruikte veldgegevens in het onderzoek van het OPLA Programma zijn niet specifiek voor de doeleinden van dit programma verzameld.

De belangrijkste activiteit van de RGD in het OPLA Programma, voor de start van Fase 1A, was het inventariseren van alle ter zake doende, openbare geologische informatie en gegevens van Noord- en Oost-Nederland (datastudies). Een globale interpretatie werd gegeven van de geologische ontwikkeling van het gebied, in het bijzonder van de daarin aanwezige zoutvoorkomens. De relevante geologische processen werden geïdentificeerd en beschreven met een bijzondere nadruk op de processen die optreden in verband met een ijstijd. Over dit onderzoek bracht de Dienst twee rapporten uit, een in 1989 en een in 1990.

Korte beschrijving van het doelgebied

Het doelgebied omvat een groot deel van Noord-Nederland: de provincies Groningen en Drenthe, het noordelijke deel van Friesland en de regio's Twente en de Achterhoek. Massieve zoutvoorkomens met een dikte tot 3.000 meter zijn aanwezig in de ondergrond van het gebied. Dit potentiële gastgesteente voor radioactief afval werd 220 tot 250 miljoen jaar geleden (de Zechstein periode) in dikke lagen afgezet door neerslag vanuit een indampend, geheel of grotendeels afgesloten zeebekken. Het steenzout sloeg neer als onderdeel van verschillende indampingscycli, waarvan ook carbonaten, sulfaten en K-Mg zouten deel uitmaakten. In de periode na het Zechstein, nadat meer dan 500 meter nieuwe sedimenten op het zout waren afgezet, begon het steenzout op verschillende plaatsen in de ondergrond te bewegen, geïnitieerd door breukbewegingen in het onderliggende pakket. Op veel lokaties resulteerde dit in de vorming van zoutkussens of, als de afdekkende lagen doorbroken werden, in zoutpijlers. De toppen van de ondiepste pijlers reiken heden ten dage tot diepten van ongeveer 100 meter onder het maaiveld. Het onverstoorde, gelaagde zout ligt doorgaans op een diepte van enkele kilometers onder het aardoppervlak.

Raamwerk van het huidige project

Op basis van de aanbevelingen in het eindrapport van Fase 1 en het commentaar van de internationale review commissie op dit rapport, zijn twee hoofddoelstellingen voor fase 1A geformuleerd, waaruit de volgende twee doelstellingen van het project GEO-1A direct aansluiten:
1. Het vaststellen en, zo mogelijk, terugbrengen van de onzekerheden in de beschrijving van de huidige en mogelijke toekomstige toestanden van de geologische barrières. De onzekerheden betreffen de (hydro)geologische gegevens, de effecten van (hydro)geologische processen en de uitkomsten van (hydro)geologische modelstudies.
2. Het nader groeperen van de Nederlandse zoutvoorkomens ten behoeve van mogelijk toekomstig veldonderzoek in een eventuele volgende fase van het OPLA Programma op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen en de verwachte toekomstige geologische stabiliteit.
Voorts heeft de Commissie OPLA aanbevolen om deel te nemen in internationale onderzoeksactiviteiten op het terrein van de opberging van radioactief afval.

Betreffende de beschrijving van de huidige toestand van de geologische barrières is een grote inspanning geleverd in de analyse van de onzekerheden in beschikbare kaartgegevens, met name de dieptekaarten van de bovenzijde van het Zechstein en van de basis van het Tertiair.
Een aanvullende inventarisatie is uitgevoerd van gegevens betreffende de matig diepe ondergrond; dit betreft in deze studie het traject tussen 10 en 500 meter. Het gaat hier met name om gegevens uit

boringen in de omgeving van een aantal ondiepe zoutstructuren die niet specifiek voor het OPLA Programma uitgevoerd zijn.
Het groeiende bestand aan verzamelde gegevens heeft het noodzakelijk gemaakt om een eenvoudig computersysteem te ontwikkelen voor de opslag en bewerking van gegevens. Een dergelijk systeem biedt meer mogelijkheden om geboekte onderzoeksresultaten te verifiëren en toekomstig onderzoek efficiënter en consistenter uit te voeren.
Twee onderzoeksonderwerpen betreffende de beschrijving van de huidige toestand van de barrières zijn gebaseerd op informatie buiten het onderzoeksgebied. Fysische boorgatmetingen en andere boorinformatie van een geselecteerd gebied in de Noordzee zijn gebruikt om hydrogeologische anomalieën in Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren op te sporen. Literatuurvoorbeelden van vele plaatsen op de wereld zijn verzameld om meer inzicht te verkrijgen in de hydrogeologische karakteristieken van breuken.

Voor de studie van de mogelijke toekomstige toestanden van de geologische barrières zijn drie processen geselecteerd die de mogelijke toekomstige toestand van de barrières direct kunnen beïnvloeden. Dit zijn: zoutbeweging, zoutoplossing (inclusief caprock-vorming) en erosie. De haalbaarheid van de ontwikkeling van een geologisch barrièremodel is het onderwerp van een afzonderlijk onderzoek geweest.

Zoutbeweging
De geomathematische methode voor de berekening van stijgsnelheden is verder verfijnd en toegepast op enkele zoutstructuren in de ondergrond van Nederland en de Noordzee. De gevoeligheid van de berekende stijgsnelheden voor de onzekerheden in invoerparameters is onderzocht.
Voor een aantal zoutstructuren in de Noordzee en Noord-Nederland is de structureel-geologische ontwikkeling bestudeerd met behulp van nieuwe kaartinformatie en gegevens van boringen en seismiek die niet specifiek voor de doeleinden van het OPLA Programma verzameld zijn. De studie naar de modellering van zoutbeweging is in een separaat projectonderdeel ondergebracht. Informatie en inzichten betreffende zoutbeweging zijn uitgewisseld met het parallelle project GEO-4A betreffende de modellering van zoutbeweging in relatie met intra-plaatspanningen (Vrije Universiteit van Amsterdam).
Voorts is enige aandacht besteed aan de interne opbouw van zoutstructuren op basis van een onderzoek aan boorkernen uit de pijler Gorleben in Duitsland en van veldwerk en excursies naar ontsloten zoutstructuren in Spanje en Iran.

Zoutoplossing
Een literatuurstudie heeft bijgedragen aan het inzicht in de fysisch-chemische mechanismen van zoutoplossing. Dit proces leidt direct tot de vorming van caprock dat bestaat uit de minder goed oplosbare bestanddelen van de indampingsgesteenten van het Zechstein. Een case study aan een 6-meter lange boorkern uit de caprock heeft een nuttige bijdrage geleverd aan de kennis van de opbouw en het ontstaan van dit gesteente en van het proces zoutoplossing zelf. Een zeer nauwe relatie heeft bestaan tussen dit onderzoeksthema en het samenwerkings-project SESAM betreffende de lokatiespecifieke grondwaterstudie dat te zamen met het RIVM en het IGG-TNO is uitgevoerd. Deels parallel aan het samenwerkingsproject loopt het EEG project betreffende de invloed van klimaatveranderingen op het grondwatersysteem en zoutoplossing. Uitkomsten van de caprock studies in het project GEO-3A (Groundcontrol) zijn gebruikt voor dit onderzoeksthema.

Erosie
Twee vormen van erosie zijn onderzocht, namelijk erosie door rivieren en erosie onder ijskappen. Een algemene literatuurstudie is gericht op de relatie tussen erosie door rivieren en bewegingen van de zeespiegel en de bodem. Een modelstudie is uitgevoerd om een beter begrip te krijgen van het mogelijke effect van erosie door rivieren op de Nederlandse ondergrond.

Het onderzoek naar erosie onder ijskappen is in het bijzonder gericht op de relatie tussen de diepte van de depressies gevormd onder ijskappen en de samenstelling van de ondergrond. Een begin is gemaakt met de ontwikkeling van een model voor erosie onder ijskappen.

Barrièremodel

Het centrale thema in het onderzoek naar het mogelijke toekomstige gedrag van de geologische barrières is de haalbaarheidsstudie naar de ontwikkeling van een geologisch barrièremodel. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van advies afkomstig van het BRGM in Frankrijk, Dames & Moore in Groot-Brittannië en de Stanford University in de Verenigde Staten.

Nadere groepering

De resultaten van het project GEO-1A vormen de basis voor de nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens. Twee groeperingen zijn uitgevoerd, een op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen en een op basis van de verwachte toekomstige geologische stabiliteit van de zoutvoorkomens.

Uitwisseling met andere onderzoeksinstituten

De Rijks Geologische Dienst heeft, binnen het kader van het project GEO-1A, met een groot aantal instituten in Nederland en het buitenland samengewerkt. Om de uitwisseling met het onderzoek aan de pijler Gorleben te intensiveren heeft de Dienst een geoloog bij de Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe gedetacheerd.
De resultaten van het project GEO-1A vormen belangrijke achtergrondinformatie voor de veiligheidsstudie PROSA (VEG-projecten) en het project GEO-2A naar geofysische methoden voor (hydro)geologische verkenning (IGG-TNO en RGD). Voor de veiligheidsstudie heeft het project GEO-1A met name bijgedragen in de scenarioselectie en de vaststelling van de geologische parameters.

Randvoorwaarden

Een belangrijke, beperkende randvoorwaarde bij de uitvoering van de GEO-1A en eerdere in het OPLA-kader uitgevoerde studies, is de beschikbaarheid van gegevens van de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland. Uitgangspunt was dat de onderzoekers in dit kader alleen gebruik konden maken van bestaande, vrij toegankelijke gegevens, alsmede van de door de RGD zelf verzamelde basisgegevens en gepubliceerde rapporten.
Een andere randvoorwaarde betrof het feit dat in Noord- en Oost-Nederland géén veldonderzoek in dit kader uitgevoerd mocht worden.

De huidige toestand van de geologische barrières

Onzekerheidsanalyse van geologische gegevens

De onzekerheidsanalyse is gericht op de ruimtelijke geologische gegevens die in algemene zin voor het OPLA Programma ter beschikking staan. In het bijzonder is de aandacht uitgegaan naar de diepteligging van geologische grensvlakken, zoals deze zijn weergegeven op contourkaarten en profielen. Een dergelijke analyse was nog niet doorgevoerd in Fase 1 van het OPLA Programma.

Voor de analyse van de dieptegegevens is de volgende aanpak gevolgd. Verschillende foutenbronnen zijn aan te wijzen voor het uiteindelijke verschil tussen de waargenomen en de werkelijke diepte van een bepaald grensvlak. De foutenbronnen worden geïntroduceerd tijdens het verkrijgen van de basisgegevens in het veld (boringen en seismische reflectie), tijdens het verwerken en interpreteren van de gegevens en bij het construeren van contourkaarten en profielen. De onderkende foutenbronnen zijn met behulp van een statistische maat gekwantificeerd, namelijk met de standaardafwijking van het verschil tussen de werkelijke en de waargenomen dieptewaarden. Bij het bepalen van deze grootheid moest in de meeste gevallen worden volstaan met een schatting op basis van "expert opinion".
Kaarten van de bovenzijde van het Zechstein en van de basis van het Tertiair die voor Fase 1

beschikbaar waren, zijn geanalyseerd. Een vergelijking is gemaakt met het meer recente kaartmateriaal dat door de reguliere kartering van de diepe ondergrond beschikbaar is gekomen. Een geïnterpreteerde versie van een seismische lijn door Noordoost-Nederland die door de RGD in 1990 was gepubliceerd, kon eveneens in de onzekerheidsanalyse worden betrokken.

De kaartgegevens zijn gebaseerd op gegevens uit boringen en seismische reflectie. Boorgegevens zijn het meest betrouwbaar. De standaardafwijking van de fout is geschat op 2 meter. Voor de dieptegegevens die afgeleid zijn uit seismische reflectie, kan de standaardafwijking van de fout oplopen tot 125 meter. Bij de constructie van contourkaarten treedt een additionele fout op die ontstaat bij de interpolatie. De grootte van deze kaart-interpretatiefout hangt af van de afstand tot de basisgegevens en de structurele complexiteit van het te karteren grensvlak. Met behulp van het opgebouwde inzicht in de onzekerheden die aanwezig zijn in de gekarteerde grensvlakken en van een aantal aannames zijn kaarten gemaakt met daarop de plaatsafhankelijke standaardafwijking van de fout in de diepteligging van de grensvlakken.

Aanvullende inventarisatie van geologische gegevens

In Fase 1 van het OPLA Programma vond een uitgebreide inventarisatie van geologische gegevens betreffende de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland plaats. Voor de bovenste 500 meter van de ondergrond waarvoor de beschikbare hoeveelheid basisinformatie beduidend groter was dan voor de diepere ondergrond, was de inventarisatie evenwel nog niet uitputtend.
Om het inzicht in het beschikbare gegevensbestand te optimaliseren is een aanvullende inventarisatie en evaluatie uitgevoerd van basisgegevens betreffende het interval tussen 10 en 500 meter onder het maaiveld in de omgeving van een aantal ondiepe Nederlandse zoutstructuren. De gegevens betreffen boringen, boorgatmetingen, conusweerstandsmetingen en hydrogeologische gegevens en zijn geëvalueerd in termen van kwaliteit en kwantiteit.
Voor de inventarisatie zijn de zoutstructuren geselecteerd waarvan de top volgens de gegevens uit Fase 1 en de hiervoor reeds genoemde seismische lijn op een diepte van minder dan 1000 meter liggen. Voor elke zoutstructuur is een gebied vastgesteld waarin de zoutstructuur en het bijbehorende zoutdepletiegebied valt.

Van de in totaal 1036 geïnventariseerde matig diepe boringen waren er 790 voldoende gedetailleerd beschreven om voor stratigrafische interpretatie in aanmerking te komen. Van 440 van deze 790 boringen ontbrak de stratigrafische interpretatie op het moment van de inventarisatie. De gemiddelde dichtheid van de matig diepe boringen die geschikt zijn voor stratigrafische interpretatie, is 1 per 1,6 km^2. De matig diepe boringen zijn doorgaans echter niet homogeen over de gebieden verspreid. Voor diepten groter dan 50 meter neemt het aantal matig diepe boringen snel af. De dichtheid van de matig diepe boringen met een einddiepte tussen 50 en 100 meter bedraagt 1 per 5,1 km^2 en voor einddiepten groter dan 100 meter 1 per 11,4 km^2.
Van de bestudeerde boringen zijn er 55 voorzien van een of meerdere boorgatmetingen. Hierbij zijn 22 boringen die een diepte groter dan 500 meter bereiken. Deze diepe boringen zijn aanwezig bij de pijlers Pieterburen, Zuidwending en Winschoten.
Conusweerstandsmetingen en hydrogeologische gegevens hebben een geringe dichtheid en dragen niet noemenswaardig bij aan het totale informatiebestand.

Voor vier van de negen structuren is meer dan de gemiddelde hoeveelheid gegevens beschikbaar. Dit zijn de structuren Anloo, Zuidwending, Winschoten en Onstwedde. Voor vijf structuren zijn minder dan de gemiddelde hoeveelheid gegevens beschikbaar. Dit geldt voor de structuren Ternaard, Pieterburen, Hooghalen, Schoonlo en Gasselte-Drouwen.

De opzet van een computersysteem voor geologische gegevens

Sinds de start van het aardwetenschappelijke onderzoek in het OPLA Programma is de hoeveelheid geologische gegevens die bijeengebracht is, beduidend gegroeid. Om een goed overzicht te behouden

over de vele versies van verschillende kaarten in verschillende formats is een geautomatiseerd datasysteem noodzakelijk. Met het datasysteem is het mogelijk een beter onderscheid te maken tussen de oorspronkelijke puntgegevens en de geïnterpoleerde gegevens, zijn de mogelijkheden om de onderzoeksresultaten te verifiëren verbeterd en zal eventueel toekomstig onderzoek efficiënter en consistenter uitgevoerd kunnen worden.
Het datasysteem is alleen voor de opslag en bewerking van afgeleide gegevens bestemd. De basisgegevens uit boringen en reflectieseismiek die toegankelijk zijn in andere bestanden, worden niet in het OPLA datasysteem opgenomen. Het datasysteem is geschikt voor toepassingen zowel binnen als buiten het systeem, zoals het maken van contourkaarten, wiskundige en statistische bewerkingen, voorbereiding van modelinvoer en grafische presentatie.

Verschillende typen gegevens kunnen onderscheiden worden, namelijk puntgegevens (bijv. boringen), lijngegevens (bijv. contouren en breuken) en rooster-/rastergegevens (bijv. geïnterpoleerde gegevens voor modelinvoer). Bij de opzet van het datasysteem is voorrang gegeven aan de opslag en bewerking van contourgegevens.

De kern van het systeem bestaat uit een relationele database (dBASEIV) en een geografisch informatiesysteem (ILWIS). Elke kaart is in een afzonderlijke file opgeslagen die te importeren is in ILWIS. Overzichten van de beschikbare kaarten met uitgebreide achtergrond informatie zijn in tabellen opgeslagen die zowel voor dBASEIV als ILWIS toegankelijk zijn. Boorgegevens zijn eveneens in de vorm van tabellen opgeslagen. Alle kaart-files en tabellen zijn in een logisch opgebouwde directory-structuur ondergebracht.
Conversieprogramma's zijn geschreven voor de uitwisseling met andere programmatuur bij de Dienst, zoals het GIS Arc/Info, het karteerprogramma ZYCOR en het grafische pakket CorelDraw.

Een groot aantal contourkaarten is reeds opgeslagen in het datasysteem, zoals topografische kaarten, kaarten van hydrogeologische eenheden en een lokatiekaart van zoutvoorkomens. In tabelvorm zijn bestanden opgenomen van de kenmerken van de Nederlandse zoutvoorkomens, van matig diepe boringen en van gepubliceerde informatie betreffende de diepteligging van de bovenzijde van het Zechstein in diepe boringen. Op verschillende wijzen is deze informatie gecombineerd en verwerkt tot grafische presentaties.

Hydrogeologische kenmerken van Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren

Dit onderdeel beoogt in het bijzonder mogelijke anomalieën in de hydrogeologische kenmerken van Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren op te sporen. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van boorgatmetingen en andere informatie uit boringen van geselecteerde gebieden in de Noordzee die in geologisch opzicht vergelijkbaar zijn met Noord-Nederland.

Twee processen die de doorlatendheid van Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren kunnen beïnvloeden, zijn onderzocht. Hiervoor zijn een aantal gesteente-eenheden geselecteerd die ook nabij Nederlandse zoutstructuren kunnen worden aangetroffen en waarvoor reeds aanwijzingen voor de aanwezigheid van hydrogeologische anomalieën bestaan.

Ten eerste is de mogelijke verhoging van de doorlatendheid in de Krijtkalk Groep in het Nederlandse deel van het Continentale Plat ten noorden van breedtegraad 53°40' bestudeerd. De Krijtkalk Groep is gekozen omdat deze eenheid boven een groot aantal zoutstructuren is aan te treffen. Door de stijging van het zout en daarmee samenhangende rekspanningen in het afdekpakket, kunnen hierin breuken en scheuren ontstaan, wat leidt tot een verhoging van de doorlatendheid. Bij een ondiepe ligging van de Krijtkalk Groep kan verkarsting de kalk nog meer doorlatend maken.
Verliezen van spoelvloeistof zijn een aanwijzing voor verhoogde doorlatendheid. Echter, in geen van de 64 geëvalueerde boorbeschrijvingen werd melding gemaakt van verlies van spoelvloeistof in de Krijtkalk Groep nabij zoutstructuren.

Ten tweede is onderzocht of mogelijke verlaging van de doorlatendheid ten gevolge van de neerslag van zout in de poriën is opgetreden. Een model is ontwikkeld om zoutcement op basis van boorgatmetingen, zoals de spectraal gamma-ray log en de dichtheidlog te identificeren. Het model werkt overigens niet in opeenvolgingen waarin ook ligniet (organisch gesteente) voorkomt.
Voor twee opeenvolgingen van zandsteen in Blok L2 van het Nederlandse Continentale Plat die ook in Noord-Nederland zijn aan te treffen, is het model met succes toegepast. Dit zijn de Volpriehausen en Detfurth Zandsteen Laagpakketten, die beiden als belangrijke reservoirs bekend zijn.
De analyse van het Volpriehausen Zandsteen Laagpakket heeft laten zien dat zoutcement tot op enkele honderden meters vanaf de zoutstructuur aanwezig kan zijn. De maximale geregistreerde afstand bedroeg minder dan 1,5 km. Het Detfurth Zandsteen Laagpakket heeft ook sporen van zoutcement laten zien. Hier wordt vermoed dat dit cement tijdens of direct na de afzetting van het laagpakket was ontstaan of afkomstig is van het Röt zout dat direct boven het laagpakket ligt.
In toekomstig onderzoek kunnen de resultaten beduidend worden verbeterd door het gebruik van geavanceerde fysische meettechnieken in boorgaten.

Hydrogeologische karakteristieken van breuken

Een uitgebreid literatuuronderzoek is gewijd aan de hydrogeologische kenmerken van breuken in de bovenste paar kilometers van de ondergrond.
De breedte van de vlakvormige breukzone hangt af van de spronghoogte van de breuk. Een verhouding tussen de breedte en de spronghoogte van 1:100 kan als richtlijn worden aangehouden. De breedte van de breukzone neemt af met de diepte ten gevolge van een veranderend vervormingsmechanisme. Breuken zijn vaak onregelmatig van vorm en kunnen gesegmenteerd zijn in zowel horizontale als verticale richting. De spronghoogte kan binnen elke breuk sterk variëren.

De doorlatendheid dwars op het breukvlak wordt bepaald door de doorlatendheid van de gesteenten aan weerszijden van de breuk. De belangrijkste parameters hierbij zijn de spronghoogte van de breuk, de dikteverhouding van de watervoerende en de slecht-doorlatende lagen en de oriëntatie van de watervoerende lagen. De doorlatendheid in de breukzone zelf wordt bepaald door de eigenschappen van het breukgesteente en de breedte en de continuïteit van de breukzone.
Bij een lage alzijdige druk kan volumevergroting (dilatatie) in de breukzone leiden tot een toename in de doorlatendheid met 300% in het centrale deel van de breukzone. Over enkele honderden meters neemt deze verhoging af tot de doorlatendheid van het niet verbroken gesteente. Bij hogere alzijdige druk vindt korrelvergruizing (kataklase) plaats. Dit kan leiden tot een toename (breccievorming) of juist een afname (gouge-vorming) van de doorlatendheid. Een afname in de porositeit met 50% en een bijbehorende afname in de doorlatendheid van 25 à 75% tot drie grootte-orden is mogelijk.
Mechanische processen zoals kleismering of klei-injectie reduceren altijd de doorlatendheid. Een kleipercentage van 25% is voldoende om de breuk vrijwel geheel ondoorlatend te maken.
Breuksegmentatie kan optreden in een afwisseling van brosse en plastische gesteenten en zal leiden tot een verlaging van de doorlatendheid. Diagenese, zoals de nieuwvorming van kleimineralen, leidt eveneens tot een verlaging van de doorlatendheid.

Processen die de toekomstige toestand van de geologische barrières beïnvloeden

Zoutbeweging

Case studies van de structurele ontwikkeling van zoutstructuren

De beschrijving van de regionale geologie van Noordoost-Nederland en van een aantal aldaar aanwezige zoutstructuren is bijgewerkt met recent beschikbaar gekomen informatie. De nieuwe informatie betreft profielen over de pijlers Klein-Ulsda, Onstwedde en Gasselte-Drouwen, die door de Dienst in 1990 zijn gepubliceerd. De beschrijving van de structuren Ternaard en Gerkesklooster is bijgewerkt met behulp van informatie van Blad II van de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond

van Nederland.

Voor de studie van de zoutstructuren in de ondergrond van de Noordzee is, in tegenstelling tot de situatie op het vasteland, gebruik gemaakt van basisgegevens uit boringen en reflectieseismiek. De gebruikte seismiek is afkomstig van een opname door Nopec/Geco-Prakla en beslaat een net van seismische lijnen met een totale lengte van 2000 km. Het onderzoek, dat gericht is op het noordelijke deel van het Nederlandse Continentale Plat, heeft geleid tot een uitgebreide beschrijving van de zoutbeweging en een geografische onderverdeling van dit gebied. De geologische opbouw van het gebied in de Noordzee is in algemene zin vergelijkbaar met die in Noordoost-Nederland. Daarom wordt aangenomen dat de conclusies die getrokken zijn uit het onderzoek op de Noordzee, ook van toepassing zijn op Noordoost-Nederland.

De zoutstructuren in het onderzochte deel van de Noordzee zijn wat de ligging betreft, bijna zonder uitzondering, gerelateerd aan een of meer breuken in het substraat van het Zechstein. Bewegingen langs de breuken maken het mogelijk dat het zout in opwaartse richting beweegt, omdat deze leiden tot een verminderde sterkte van het afdekpakket en tot een differentiële spanning in het zout ten gevolge van differentiële belasting. De opwaartse kracht gekoppeld aan de dichtheidsinversie schijnt op zich niet voldoende te zijn om de sterkte van het afdekpakket te overwinnen. In dit onderzoek is een verband aangetoond tussen het optreden van regionale tektonische deformatiefasen en een toename in de intensiteit van zoutbeweging.
Breukvorming is het initiërend mechanisme voor zoutbeweging. Hoe groter de spronghoogte van de breuken in het substraat is, hoe beter de zoutstructuur ontwikkeld zal zijn. De strekking van de breuken onder het Zechstein wordt weerspiegeld in de oriëntatie van de zoutstructuren die boven de breuken liggen. Deze relatie is niet alleen aanwezig in de Noordzee maar ook in Noord-Duitsland.
Gebaseerd op het ontwikkelingsstadium van de zoutstructuren, is een geografische onderverdeling gemaakt van het Nederlandse deel van het Continentale Plat, die overeenstemt met de onderverdeling in structureel-geologische eenheden van hetzelfde gebied. Een soortgelijke onderverdeling is gegeven voor Noordoost-Nederland.

In veiligheidsstudies die zich richten op tijdschalen van miljoenen jaren, zal rekening gehouden moeten worden met geïntensiveerde zoutbeweging als gevolg van verhoogde regionale tektonische activiteit.

Verfijning van de methoden voor de berekening van stijgsnelheden

De methodiek voor de berekening van stijgsnelheden van zoutstructuren is verbeterd en toegepast op een aantal gevallen in Nederland en de Noordzee.
Een correctiefactor voor compactie tijdens de afzetting van het beschouwde laagpakket (syn-correctie) die in Fase 1 wel toegepast was, kon op theoretische gronden achterwege gelaten worden. Voorts is de correctiefactor voor compactie van de sedimenten onder het beschouwde laagpakket (pre-correctie) uitgebreid voor compactie in Mesozoïsche gesteenten. Het niet toepassen van compactie-correcties kan leiden tot fouten oplopend tot tweemaal de berekende waarde met compactie-correcties.
De verbeterde methode heeft geleid tot een meer nauwkeurige berekening van de gemiddelde inwendige en uitwendige stijgsnelheden.
De berekende gemiddelde uitwendige stijgsnelheden zijn enkele tientallen procenten tot een factor 2,5 lager dan de berekende waarden in Fase 1 van het OPLA Programma. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een aantal zoutstructuren in Noordoost-Nederland en in de M-blokken van het Nederlandse deel van het Continentale Plat. De berekende waarden van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid variëren tussen -0,04 en 0,06 mm/jaar. Voor de pijler Schoonlo is een relatief hoge gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm/jaar berekend. In Fase 1 was deze nog berekend op 0,28 mm/jaar.
In het algemeen waren de gemiddelde inwendige stijgsnelheden van de Nederlandse zoutstructuren gedurende het Vroeg- en Midden-Oligoceen 3 tot 5 keer hoger dan gedurende het Laat-Tertiair en Kwartair. De Oligocene periode viel samen met een periode van verhoogde tektonische activiteit. Het verschil in de gemiddelde stijgsnelheid voor de twee geologische perioden ondersteunt de vermoede

relatie tussen versnelde zoutbeweging en verhoogde regionale tektonische activiteit.
De onnauwkeurigheid in de vaststelling van de horizontale omvang van een zoutstructuur heeft geresulteerd in een minimale en een maximale waarde van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid die tot een factor 2 kan verschillen.

Voor de structuren in de ondergrond van de Noordzee moest de berekening van de gemiddelde stijgsnelheden, vanwege de beschikbaarheid van andere gegevens, voor andere geologische perioden uitgevoerd worden. Voor de Noordzee zijn gemiddelde stijgsnelheden voor het Laat-Krijt en het Tertiair berekend. Deze lange perioden omvatten meerdere tijdspannen van verhoogde tektonische activiteit en van relatieve rust. De berekende waarden voor de gemiddelde inwendige en uitwendige stijgsnelheden zijn van een vergelijkbare grootte-orde (10^{-2} tot 10^{-1} mm/jaar), met maxima voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van 0,11 mm/jaar en 0,12 mm/jaar voor de gemiddelde inwendige stijgsnelheid. De berekende stijgsnelheden stemmen overeen met reeds eerder gepubliceerde waarden uit het Europese Permbekken.
In het onderzoek is het niet mogelijk gebleken om een uitspraak te doen over de totale hoeveelheid zout die door oplossing en erosie was verdwenen.

Modellering van zoutbeweging

Een literatuuronderzoek is uitgevoerd naar bestaande modellen voor zoutbeweging. Deze modellen kunnen worden onderverdeeld in analytische modellen (lineaire stabiliteitsanalyse), experimentele modellen en numerieke modellen.
In de experimentele modellen zijn geometrische, kinematische en, tot op zekere hoogte, dynamische benaderingen van de werkelijkheid mogelijk. Dit type model levert relevante informatie in drie dimensies op. De grootste nadelen met betrekking tot de doelen uit het OPLA Programma zijn het gebrek aan kwantitatieve resultaten, de onzekerheden bij het omrekenen van de experimenteerschaal naar de werkelijke schaal en de beperkte flexibiliteit van experimentele modellen.
De lineaire stabiliteitsanalyse voorspelt de groeisnelheid en de onderlinge afstand van de zoutstructuren onder de invloed van de zwaartekracht. De analyse geldt alleen voor de eerste (lineaire) vervorming van de zoutstructuur. Dit type modelleren is geschikt als toets van software voor numerieke modellen.
De meest realistische modellen zijn de numerieke modellen. Het voordeel van deze modellen is dat parameters, zoals druk, temperatuur en spanning, op elke plaats en elk moment in het model berekend kunnen worden. Recente numerieke modellen omvatten sedimentatie, erosie, topografie-effecten, een diepte-afhankelijke dichtheid en viscositeit van het sediment en een realistisch reologisch model van het zout. De modellen zijn nauwkeurig.
De bestaande numerieke modellen hebben voor het onderzoek in het OPLA Programma echter nog enige beperkingen, omdat:
- de reologische beschrijving van het afdekpakket nog niet voldoende uitgewerkt is en
- geen breukvorming in het substraat ingebouwd is.

Het reologische model ontwikkeld aan de Vrije Universiteit van Amsterdam (project GEO-4A) vormt een Ongeschikte basis voor het incorporeren van zowel bros als plastisch gedrag van verschillende typen gesteenten. Breukvorming in het substraat en erosie kunnen door middel van (flexibele) randvoorwaarden worden ingebracht. De modeluitkomsten zullen getoetst moeten worden aan veldwaarnemingen betreffende zoutbeweging in het geologische verleden.

Aspecten van de interne opbouw van zoutstructuren

Zoals in Fase 1 van het OPLA Programma gebleken is, is weinig bekend over de interne opbouw van Nederlandse zoutstructuren. In het project GEO-1 dat de Dienst in deze fase uitvoerde, is een indicatie gegeven van de interne opbouw op basis van de regionale ontwikkeling van het Zechstein in Nederland, aangevuld met informatie van enkele goed gedocumenteerde voorbeelden uit Duitsland. Om het inzicht in de interne opbouw te vergroten zijn veldwerk en excursies uitgevoerd bij aan het

aardoppervlak ontsloten zoutstructuren in Iran en Spanje en is onderzoek uitgevoerd aan boorkernen van het steenzout in de pijler Gorleben (Duitsland).

In Iran is een aantal diapieren bezocht die onder twee verschillende regionale tektonische regimes waren gevormd. De bezochte diapieren in het Zagros Gebergte waren ontstaan onder invloed van regionale tektonische activiteit, terwijl de diapieren in de Dasht-i-Kavir onder tektonisch meer stabiele omstandigheden waren ontstaan.
De ontsloten zoutstructuur van Cardona in Spanje is een uitzonderlijk goed voorbeeld van de interne structuur van het zout op verschillende schalen, van enkele centimeters tot enkele honderden meters. Uit onderzoek aan een aantal boorkernen van de pijler Gorleben is gebleken dat de kristalgrootte van het steenzout afneemt met toenemende mate van vervorming. Vele primaire structuren zijn verbroken. Carnallietinsluitsels die vermoedelijk na de afzetting van het steenzout zijn gevormd, wijzen op de migratie van pekel.

Caprock-vorming en zoutoplossing

Case study van de opbouw en het ontstaan van caprock

Een kern van 6 meter lengte uit het onderste deel van de caprock van de pijler Zuidwending was beschikbaar voor gedetailleerd petrografisch en geochemisch onderzoek.

Een aantal geochemische technieken is toegepast voor een continue analyse van de chemische samenstelling van de boorkern ("Induced Coupled Plasma" en "X-Ray Fluorescence" technieken). Op basis hiervan zijn monsters geselecteerd voor meer gedetailleerde analyses van de samenstelling ("Instrumental Neutron Activity Analysis"). Aanvullend zijn de isotopen van Sr, O, H, S en U-Pb geanalyseerd. Honderd dunne doorsneden zijn van de boorkern gemaakt voor de gesteente-beschrijving. Drie niveaus zijn getest op sporen van paleomagnetisme.

De kern bestaat van boven naar onder uit: 3 meter gips, 2,5 meter anhydriet en een halve meter gipszand. De open en gesloten aders in de anhydriet zijn voornamelijk subhorizontaal georiënteerd. Het traject met gipszand is homogeen grofkorrelig en nauwelijks geconsolideerd.
De overgang van anhydriet naar gips op 3 meter vanaf de basis is zichtbaar als een scherpe grens. Spore-elementen zijn met name geconcentreerd in het anhydrietgedeelte. De $^{87}Sr/^{86}Sr$-verhouding neemt af van boven naar beneden. δD waarden zijn nagenoeg constant in de monsters die het verst van de zoutspiegel verwijderd zijn en worden meer negatief in de richting van de zoutspiegel. De verschuiving in δD is ongeveer 12 . De $\delta^{18}O$-verhouding laat geen duidelijke trend met de diepte zien; zij varieert tussen -4 en -7 . De $^{207}Pb/^{204}Pb$- en de $^{208}Pb/^{204}Pb$-verhoudingen vertonen positieve trends, dat wil zeggen verhoogd radioactief met toenemende diepte. De $^{206}Pb/^{204}Pb$ en de $^{238}U/^{204}Pb$ verhoudingen zijn niet gecorreleerd, wat in het geval van uranium toegeschreven kan worden aan de onzekerheid van de analysemethode. Het paleomagnetische signaal bevindt zich beneden de detectiegrenzen van de gebruikte magnetometer.

De samenstelling van de onderste halve meter van de caprock vormt een bewijs voor de lage saliniteit van de oplossende pekel. Uit de structuur van de caprock kan worden afgeleid dat de vloeistofstroming ter plekke voornamelijk subhorizontaal was. De afwezigheid van een verticale chemische gradiënt in het gipsdeel van de caprock pleit duidelijk tegen een gradiënt in de saliniteit van het water in de caprock. Diffusieprocessen moeten daarom als niet relevant beschouwd worden.

Modellering van zoutoplossing

Op basis van de beschikbare literatuur is onderzocht welke processen en parameters de zoutoplossing (subrosie) van Nederlandse zoutstructuren bepalen en in hoeverre deze aspecten reeds in bestaande modellen waren verwerkt of nog ingebracht moeten worden. Binnen het OPLA Programma wordt zoutoplossing momenteel gesimuleerd in het model Metropol-3 van het RIVM (zie ook het eindrapport

van het samenwerkingsproject SESAM).

In het model Metropol-3 worden het steenzout, de zoutspiegel en de caprock zelf als één eenheid beschouwd. Voorts wordt aangenomen dat opwaarts transport van zout door de caprock door middel van diffusie plaatsvindt.

De oplossing van zoutpijlers wordt primair bepaald door:
- de hoeveelheid beschikbaar oplosmiddel per tijdseenheid,
- de oplossnelheid en
- de oplosbaarheid van de mineralen in de pijler.

Deze parameters worden op hun beurt weer bepaald door een verzameling, vaak onderling gekoppelde, parameters, zoals temperatuur, druk, samenstelling van de vloeistof en de doorlatendheid van de omringende sedimenten. De effecten van temperatuur en druk op de oplossnelheid en oplosbaarheid zijn goed bekend uit de literatuur. Zowel de oplossnelheid als de oplosbaarheid nemen toe met toenemende temperatuur en stroomsnelheid van de vloeistof.
De stroomsnelheid in de watervoerende lagen die in Noordoost-Nederland aanwezig zijn, neemt snel af met toenemende diepte. Aangezien het effect van de afnemende stroomsnelheid de gevolgen van toenemende oplossnelheid en oplosbaarheid overheerst, zal de subrosiesnelheid van Nederlandse zoutpijlers snel met toenemende diepte afnemen.
Bestaande subrosiemodellen kunnen verder ontwikkeld worden op basis van het hier opgebouwde inzicht. Een meer gedetailleerde hydrogeologische schematisatie van de directe omgeving van de zoutspiegel zal een belangrijke verbetering zijn. Steenzout, zoutspiegel en caprock dienen als aparte hydrogeologische eenheden te worden beschouwd. Voorts dient het subrosiemodel uitgebreid te worden met een fysisch-chemische module voor de zoutoplossing. Het model Metropol-3 zal met deze aanpassingen de beste mogelijkheden bieden voor een zoveel mogelijk natuurgetrouwe simulatie van zoutoplossing.

Erosie door rivieren en onder ijskappen

Riviererosie in samenhang met bewegingen van zeespiegel en bodem

Dit projectonderdeel heeft zich geconcentreerd op de processen en de interacties tussen de processen die erosie door rivieren sturen en op de effecten van deze vorm van erosie op de ondergrond. Erosie en sedimentatie door rivieren zijn het resultaat van een complex systeem van processen, waarvan de belangrijkste zijn: zeespiegelbewegingen, tektonische bewegingen en klimaatverandering. In aanvulling, en afhankelijk van de beschouwde tijd- en ruimteschalen, wordt het riviersysteem bepaald door een aantal factoren, die hier niet nader benoemd worden. Voor verschillende tijd- en ruimteschalen zijn de relevante processen en factoren beschreven.

Uit waarnemingen aan afzettingen uit het jongste deel van het Kwartair is gebleken dat in gebieden in Nederland met een vlakke gradiënt van 20 tot 25 cm/km rivieren niet dieper insneden dan 20 meter onder het toenmalige landoppervlak. Opheffing, zoals in Limburg tijdens het Kwartair optrad, kan in combinatie met een lage zeespiegelstand leiden tot een diepere insnijding van rivieren.
Het is niet te verwachten dat onder omstandigheden die vergelijkbaar zijn met die in het jongste deel van het Kwartair, de Nederlandse zoutstructuren in de toekomst door riviererosie zullen worden beïnvloed.

Modellering van riviererosie

Het model FLUVER dat voor deze studie ontwikkeld is, strookt met de waarnemingen betreffende riviererosie die in de voorgaande passage vermeld zijn. FLUVER is een "eindige-toestanden" model, dat over een periode van 500.000 jaar de ontwikkeling van een rivierlandschap simuleert, bepaald door reliëf, klimaat, tektoniek en veranderingen in de erosiebasis door zeespiegelbewegingen.
De uitkomsten van vier simulaties hebben laten zien, dat, onafhankelijk van de resultaten uit de hiervoor reeds genoemde bureaustudie, insnijding door rivieren sterk bepaald wordt door bewegingen van de bodem en de zeespiegel.

Gedurende een periode van 500.000 jaar en een gemiddelde bodemdaling van maximaal 0,01 mm/jaar is binnen het model een maximale daling van de erosiebasis met 20 meter voorspeld. Diepere insnijding tussen 20 en 100 meter kan alleen worden verwacht bij een zeer lage zeespiegelstand in combinatie met tektonische opheffing. Deze combinatie is geen realistische aanname voor de omstandigheden in Noord-Nederland.

Erosie onder ijskappen met de nadruk op de opbouw van de ondergrond

Het onderzoek aan erosie onder ijskappen borduurt voort op de resultaten die in het vervolgonderzoek van het project GEO-1 (Vervolg GEO-1) betreffende dit onderwerp waren geboekt.
Tijdens de ijstijd van het Elsterien waren diepe depressies ontstaan in een brede zone in Noordwest-Europa. De nu opgevulde diepe depressies worden gekenmerkt door een diepte tussen de 50 en 450 meter, een breedte tussen 1 en 10 km, een onderlinge afstand tussen 9 en 13 km en een lengte tot 200 km. In het onderhavige onderzoek is het verband tussen deze karakteristieken en de opbouw van de ondergrond statistisch geanalyseerd. Ten behoeve hiervan waren de volgende gebieden onderscheiden: Noord-Nederland (zandige ondergrond), Noord-Duitsland (zandige ondergrond), Noord-Duitsland (kleiige ondergrond), de Noordzee (zandige ondergrond) en de Noordzee (kleiige ondergrond). Als uitgangspunt in het statistisch onderzoek is genomen dat de kenmerken voor de zandige en de kleiige gebieden niet verschillen.
Behalve voor de parameter diepte kon geen relatie aangetoond worden tussen de ruimtelijke parameters van de diepe depressies uit het Elsterien en de samenstelling van de ondergrond.
Echter, de beperkte kwaliteit van de beschikbare data heeft niet toegelaten om de hiervoor vermelde relatie al te sterk te bevestigen of te ontkennen.

Twee concepten zijn beschikbaar voor het verklaren van het ontstaan van de diepe depressies uit het Elsterien. Een concept gaat uit van het op catastrofale wijze ontstaan van de diepe depressies door het plotselinge optreden van erosie door smeltwater. Het tweede concept, dat het meest aannemelijk lijkt, is een "steady-state" model waarin insnijding plaatsvindt door een combinatie van erosie door de ijskap zelf en door het onder de ijskap aanwezige smeltwater.

Modellering van erosie onder ijskappen

Het model SUBGLER, voor het simuleren van erosie onder ijskappen, bevindt zich in een beginstadium van ontwikkeling. Het model is twee-dimensionaal, verticaal georiënteerd, volledig numeriek en gebaseerd op sterk vereenvoudigde fysische relaties uit de glaciologische literatuur. Het model simuleert erosie door smeltwater in een afvoerkanaal aan de basis van een grote continentale ijskap. Seizoenseffecten zijn in het model geïncorporeerd. Het model SUBGLER wordt gestuurd door het reliëf, kenmerken van de watervoerende lagen en aan klimaat gekoppelde kenmerken.
Simulaties met het model laten zien dat klimaatgebonden parameters, zoals het ijskapprofiel, de gemiddelde zomertemperatuur en de terugtrekkingssnelheid van de ijskap, waarschijnlijk de overheersende parameters zijn in de vorming van diepe depressies onder ijskappen.
De uitkomsten van het model SUBGLER geven aan dat de invloed van de samenstelling van de ondergrond ondergeschikt is aan de klimaatgebonden factoren.

Haalbaarheid van de toekomstige ontwikkeling van een geologisch barrièremodel

Uitgangspunten voor de toekomstige ontwikkeling van een barrièremodel

Een geologisch barrièremodel wordt verondersteld de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de geologische barrières die aanwezig zijn rondom een opbergfaciliteit voor radioactief afval, gedurende een bepaalde periode in de toekomst te simuleren. Het mogelijk in de toekomst te ontwikkelen model is gericht op de specifieke geologische omstandigheden in Noordoost-Nederland. Met een dergelijk model wordt het mogelijk om de aanwezige onzekerheden in de aannames, de procesgang en de effecten op de

barrières beter te lokaliseren en af te grenzen.

Een Nederlands geologisch barrièremodel heeft bij voorkeur de volgende *karakteristieken*:
- Een degelijke, voor zover mogelijk fysisch-mathematische, beschrijving van processen en gesteente-eigenschappen.
- Een deterministische aanpak in de beschrijving en modellering van processen en gesteente-eigenschappen, aangevuld met een probabilistische benadering waar het complexe of onzekere aspecten van de processen of gesteente-eigenschappen betreft.
- Een tijdsafhankelijke simulatie van processen en gesteente-eigenschappen en hun interacties in gekoppelde submodellen, aangestuurd door de primaire tijdsafhankelijke processen: Het klimaat en het tektonisch regime.
- Alle relevante exogene en endogene processen die de barrières direct of indirect kunnen beïnvloeden, dienen in het model te worden opgenomen.

Samenwerking in nationaal en internationaal verband is een belangrijke *voorwaarde* vanwege het feit dat voor de ontwikkeling van een dergelijk model zeer specialistische kennis vereist is. Daarnaast is het kostbaar en arbeidsintensief, zodat gebruik van reeds bestaande modellen ten zeerste aan te bevelen is.

Evaluatie van bestaande modellen

Vier bestaande geologische barrièremodellen en twee bekkenmodellen zijn geëvalueerd op hun geschiktheid als basismodel voor het Nederlandse geologisch barrièremodel. De boven genoemde gewenste karakteristieken en voorwaarde dienden als referentiekader. De onderzochte barrièremodellen, die specifiek voor opberging van radioactief afval ontwikkeld zijn, zijn GSM, FFSM, CASTOR en TIME4. De probabilistische modellen GSM en FFSM zijn ontwikkeld in de VS door INTERA. CASTOR werd in Frankrijk ontworpen door BRGM en heeft deterministische karakteristieken. TIME4 is in Groot-Brittannië ontwikkeld door Dames & Moore International; het model maakt in hoge mate gebruik van probabilistische principes. De twee deterministische bekkenmodellen SEDPAK en SEDSIM worden ontwikkeld aan Amerikaanse universiteiten, respectievelijk de University of South Carolina en Stanford University (Ca).

Van de vier geologische barrièremodellen simuleren GSM, FFSM en CASTOR zowel endo- als exogene processen. Geen van de modellen bevat ingebouwde modulen voor de verandering van gesteente-eigenschappen in de tijd. Het onderhavige onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat de invulling van de tijdsafhankelijkheid in de modellen onvoldoende was voor de doeleinden in deze studie. De fysische onderbouwing van de modellen die specifiek voor afvalberging ontwikkeld zijn, is niet bevredigend. CASTOR bevindt zich nog in een vroege ontwikkelingsfase. Samenwerking is mogelijk met BRGM en Dames & Moore.

Na evaluatie van de vier barrièremodellen en na het testen van het model FFSM in het bijzonder, bleek geen van de vier modellen geschikt als basis voor een te ontwikkelen Nederlands geologisch barrièremodel. Het belangrijkste argument voor deze uitkomst is de relatief povere fysisch-mathematische beschrijving van de processen en de gesteente-eigenschappen. Daarom is in een later stadium besloten om de twee bekkenmodellen SEDPAK en SEDSIM in de evaluatie te betrekken. Het model SEDSIM lijkt een goede kandidaat te zijn om als basis voor een Nederlands geologisch barrièremodel te dienen. Dit model simuleert zowel endo- als exogene processen. De processen en gesteente-eigenschappen zijn van een degelijke fysisch-mathematische onderbouwing voorzien. Tijdsafhankelijke sturing is afwezig maar kan waarschijnlijk vrij eenvoudig in het model worden ingebouwd. Samenwerking is mogelijk met de Stanford University, waar het model SEDSIM wordt ontwikkeld.

Haalbaarheid van een geologisch barrièremodel

Gebaseerd op de resultaten van dit onderzoek, is een structuur opgezet voor een eventueel te ontwikkelen Nederlands geologisch barrièremodel, waarvoor de naam MOTTO gekozen is: MOdel voor Toekomstige Tijdsafhankelijke ontwikkeling van de Ondergrond. Dit model moet de volgende componenten omvatten:
1. Een lokaal model waarin alle exo- en endogene processen die de geologische barrières kunnen beïnvloeden, ingebouwd zijn. SEDSIM is het meest geschikt om hiervoor als basismodel te dienen.
2. Een supralokaal exogeen model, dat de tijdsafhankelijke exogene invoer voor het lokale model levert.
3. Een supralokaal endogeen model, dat de tijdsafhankelijke, endogene invoer voor het lokale model levert.

Om een eerste versie van het barrièremodel te ontwikkelen is een periode van enkele jaren nodig. Hierin wordt het modelconcept ontworpen aan de hand van processtudies, het concept omgezet in programmacode en het model gevalideerd. Gezien de complexiteit en uitgebreidheid van een dergelijk onderzoek is een grote en permanente inzet van gespecialiseerd personeel noodzakelijk gedurende deze periode. Veldgegevens zullen nodig zijn voor de studie van een aantal processen, het vaststellen van de randvoorwaarden van het model alsmede het valideren van het model.

Nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens

Inleiding

In Fase 1 van het OPLA Programma staan twee aspecten in het onderzoek centraal, namelijk de technische uitvoerbaarheid en de veiligheid van geologische opberging in de diepe ondergrond. Een onderdeel van de technische uitvoerbaarheid dat in hier aan de orde komt, hangt samen met de inpasbaarheid van de opbergontwerpen in de Nederlandse zoutvoorkomens. Op basis van de inpasbaarheid is een proeve van een groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens gegeven. De uitkomsten van deze groepering zijn van *voorlopige* aard en bedoeld om richting te geven aan verder onderzoek daar een definitieve uitspraak over de inpasbaarheid pas gegeven kan worden als het inwendige van een of meerdere zoutvoorkomens in een eventuele volgende fase is onderzocht.
In dit deel van de uitgebreide samenvatting is voorts een indicatie gegeven voor een geologische groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens op basis van de te verwachten geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar. Het begrip "geologische stabiliteit" heeft hier betrekking op veranderingen in de toestand van de ondergrond, in het bijzonder in die van het zout, onder invloed van de te verwachten stijgsnelheid van het zout en van effecten van een te verwachten ijstijd. Deze groepering is alleen op geologische gronden gebaseerd en dient in feite in samenhang met ander keuze-overwegingen te worden bezien. De uiteindelijke betekenis van deze groepering voor de veiligheid van het opgeborgen afval kan pas worden aangegeven als de betrokken geologische processen in een veiligheidsstudie zijn geanalyseerd. Uit een gevoeligheidsanalyse in de huidige veiligheidsstudie PROSA komt naar voren dat de inwendige stijgsnelheid een van de meer gevoelige parameters is als het gaat om het veiligheidsrisico van opberging.

Inventarisatie van de zoutvoorkomens

Nadat Fase 1 van het OPLA Programma in 1988 was beëindigd, is door de reguliere kartering van de ondergrond van Nederland nieuwe informatie beschikbaar gekomen. In het algemeen wordt deze nieuwe informatie gekenmerkt door een grotere nauwkeurigheid dan die in Fase 1 beschikbaar was. In Fase 1 van het OPLA Programma waren in totaal 38 zoutvoorkomens geïdentificeerd. In de huidige Fase 1A zijn dat er 45 (één zoutvoorkomen in Zuid-Drenthe bestaat uit minimaal 3 diepgelegen zoutkussens, die in het huidige onderzoek niet afzonderlijk onderscheiden zijn). De toename in het aantal zoutvoorkomens is grotendeels het gevolg van het opdelen van grotere zoutlichamen in een aantal kleinere op basis van de meer nauwkeurige geometrische gegevens.

De structuur Ulrum in *Noord-Nederland* komt niet meer voor op de lijst van voorkomens in Fase 1A. Een recente inventarisatie van zoutvoorkomens in Nederland die buiten het kader van het OPLA Programma was uitgevoerd, bevestigde, afgezien van het voorkomen Ulrum, echter de aanwezigheid van de zoutvoorkomens die in Fase 1 in Noord-Nederland waren onderscheiden.
De meer gedetailleerde informatie leverde voor Noord-Nederland 6 nieuwe zoutstructuren op waarvan de top dieper dan 1 kilometer ligt: een structuur ligt in het zuidoostelijke deel van Friesland en vijf zijn aanwezig in de omgeving van het gebied met gelaagd zout dat in Fase 1 in Groningen onderscheiden was. Het totale aantal zoutvoorkomens in Noord-Nederland is nu 33.
De informatie voor *Oost-Nederland* (Twente en de Achterhoek) is schaars gebleven. De zoutstructuur Weerselo die in Fase 1 geïdentificeerd was, blijkt uit twee culminaties te bestaan. Deze worden nu de zoutstructuren Weerselo en Deurningen genoemd. Het Zechstein zout in Twente is vermoedelijk niet horizontaal gelaagd; het bestaat naar verwachting uit een drietal zoutkussens. Een van de zoutkussens wordt Tubbergen genoemd; naar de andere twee wordt gerefereerd met de namen Twente I en II. Het totale aantal zoutvoorkomens in Oost-Nederland is 12.

Het zoutvoorkomen Ermelo in het *centrale deel van Nederland* is verwijderd van de lijst van zoutvoorkomens. Dit voorkomen maakt deel uit van een serie zeer kleine zoutlichamen die in een brede ZO-NW verlopende zone in het centrale deel van Nederland aanwezig zijn.

De onzekerheden in de dieptewaarden van de toppen van de zoutvoorkomens zijn voor zover mogelijk gekwantificeerd, wat de betrouwbaarheid van de groeperingen op basis van de diepteligging beduidend heeft verbeterd. De resultaten van de groeperingen worden hierna besproken.

Groepering op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen

De groepering op basis van mijnbouwkundige overwegingen is grotendeels gebaseerd op de aanpak die in Fase 1 was gevolgd. In tegenstelling tot in Fase 1 is geen gebruik gemaakt van flexibele dimensies van de opbergontwerpen. De dimensies van de opbergontwerpen, zoals deze uit de mijnbouwkundige studie van Van Hattum & Blankevoort in 1986 af te leiden zijn, zijn direct toegepast in de huidige groepering. De gehele exercitie is gebaseerd op de strategie met het grootste volume van radioactief afval.

Een op deze overwegingen gebaseerde opbergmijn past waarschijnlijk in 7 van de thans onderscheiden zoutlichamen; 23 voorkomens zijn wanneer het ontwerp van 1986 niet wordt aangepast, waarschijnlijk te klein of liggen te diep en voor 13 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. Het opbergontwerp voor droge cavernes in combinatie met diepe boorgaten past waarschijnlijk in 2 zoutlichamen; in 33 zoutvoorkomens is deze optie volgens de opzet van 1986 waarschijnlijk niet uitvoerbaar en voor 8 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. De constructie van natte cavernes in combinatie met diepe boorgaten is waarschijnlijk mogelijk in 19 zoutvoorkomens; in 9 voorkomens is de aanleg waarschijnlijk niet mogelijk op basis van de uitgangspunten in 1986 en voor 15 voorkomens is het onzeker. Voor twee zoutvoorkomens in de ondergrond van Nederland is het door het ontbreken van voldoende relevante gegevens niet mogelijk de inpasbaarheid van de opbergontwerpen te evalueren. Deze groepering verschilt op onderdelen van die in Fase 1 omdat nieuwe ruimtelijke gegevens zijn gebruikt, de onzekerheden in de gegevens meegenomen zijn en omdat ten aanzien van de opbergontwerpen geen flexibiliteit met betrekking tot de dimensies is aangenomen.

In dit onderzoek is, naast de gevolgde aanpak uit Fase 1, een alternatieve methode gedeeltelijk uitgewerkt om daarmee de geologische gegevens beter bruikbaar te maken voor de mijnbouwkundige inpassing. De methode komt er op neer dat met behulp van een computerprogramma uit de diepte- en diktegegevens betreffende het Zechstein via een aantal stappen de geometrie en de grootte van het beschikbare opbergvolume kan worden bepaald. Meer mijnbouwkundige informatie is echter nodig om de inpasbaarheid van de opbergontwerpen in Nederlandse zoutstructuren, op basis van de geometrie en de grootte van het beschikbare opbergvolume, verder te kunnen uitwerken.

Groepering op basis van de verwachte toekomstige geologische stabiliteit

In een voorgaand project aan het einde van Fase 1 was een overweging betreffende de diepteligging van de top van de Nederlandse zoutvoorkomens ontwikkeld voor de verwachte geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar. Deze overweging hield in dat zoutvoorkomens waarvan de huidige top ondieper dan 540 meter onder het maaiveld ligt, in combinatie met zoutstijging en erosie door rivieren, mogelijk door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar worden beïnvloed. Dit wil overigens niet zeggen dat daarmee de veiligheid van opberging in gevaar komt. Diverse (samenhangende) factoren spelen daarbij een rol waarover eerst in een veiligheidsanalyse duidelijkheid moet worden verkregen. Door het in deze fase van het onderzoek verkregen inzicht zijn de aannames betreffende erosie door rivieren en zoutstijging die ten dele de grondslag voor deze overweging vormen, iets gewijzigd. De hier toegepaste overweging betreffende de diepteligging wijkt nagenoeg niet af van de hiervoor genoemde en is met afronding op vijftigtallen vastgesteld op 550 meter.

Van de thans onderscheiden zoutlichamen liggen er waarschijnlijk 23 te diep om door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar te worden beïnvloed, terwijl 9 zoutvoorkomens wel door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar zouden kunnen worden aangesneden. Voor 7 zoutvoorkomens is de onzekerheid in de basisgegevens te groot om een conclusie te trekken. Voor 6 voorkomens is de evaluatie helemaal niet mogelijk omdat een deel van de relevante gegevens ontbrak.
Afwijkingen van een vergelijkbare groepering in het project Vervolg GEO-1 zijn veroorzaakt door het gebruik van nieuwe kaartinformatie en het in de groepering betrekken van de onzekerheden in de dieptewaarden.

Opbrengst voor de veiligheidsstudie

De uitkomsten van het project GEO-1A zijn breed ingezet in de beschrijving van de FEPs (features, events and processes), een onderdeel van de scenario-analyse in de veiligheidsstudie PROSA. Het project GEO-1A heeft direct bijgedragen in de vaststelling van de invoerparameters voor de subrosiescenario's, met name betreffende de parameter "inwendige stijgsnelheid".
Uit de literatuurstudie naar hydrogeologische kenmerken van breuken is gebleken dat de in de literatuur vermelde doorlatendheden van breuken binnen de variatiebreedte van de gekozen doorlatendheden in de veiligheidsstudie vallen.
De betrouwbaarheidsanalyse van ruimtelijke gegevens en het overzicht van kenmerken van Nederlandse zoutvoorkomens biedt in principe aanknopingspunten voor het toetsen van veiligheids-relevante kenmerken in PROSA.
Een indirecte bijdrage aan PROSA heeft de RGD geleverd door haar participatie in het samenwerkings-project SESAM vanuit het project GEO-1A. Het project SESAM dat te zamen met RIVM en IGG-TNO is uitgevoerd, is een ondersteunende studie van PROSA.

Voor veiligheidsstudies op de langere termijn heeft het project GEO-1A eveneens resultaat geboekt. Hierbij wordt specifiek verwezen naar de haalbaarheidsstudie betreffende de ontwikkeling van een geologisch barrièremodel en de modelstudies die op afzonderlijke geologische processen gericht zijn, te weten zoutbeweging, zoutoplossing en erosie.

Conclusies en aanbevelingen

Conclusies betreffende de vaststelling van onzekerheden

1. De nauwkeurigheid van ruimtelijke geologische informatie die voor het OPLA onderzoek ter beschikking heeft gestaan, is systematisch geanalyseerd. De aandacht is in het bijzonder uitgegaan naar de *diepteligging* van de bovenzijde van het Zechstein en van de basis van het Tertiair. De dieptebepaling in boringen en boorgatmetingen heeft een standaardafwijking van de fout die doorgaans kleiner is dan 2 meter. De standaardafwijking van de fout in de dieptebepaling op basis van seismische gegevens kan oplopen tot 125 meter. Bij de constructie van contourkaarten met behulp van

de basisgegevens treedt een additionele kaart-interpretatiefout op die in het algemeen toeneemt met de afstand tot het basisgegeven. Door de nauwkeurigheid in de dieptebepaling te analyseren zijn thans meer betrouwbare uitspraken over de diepteligging mogelijk dan in Fase 1 het geval was.
De kwaliteit van het kaartmateriaal betreffende de bovenzijde van het Zechstein dat voor het OPLA onderzoek beschikbaar komt, neemt toe. Op het kaartmateriaal van de bovenzijde Zechstein dat in Fase 1 beschikbaar was, liep de standaardafwijking van de fout in de dieptebepaling veelal op tot 100 à 250 meter. Op de meest recent beschikbaar gekomen kaarten bedraagt de standaardafwijking van de fout in sommige gebieden 25 à 50 meter.
Uit de kaartbeelden zijn parameters afgeleid zoals de omvang en de diepteligging van de zoutvoorkomens die in het onderhavige onderzoek gebruikt zijn voor de nadere groepering.
2. *Breuken* zijn geen vlakken zoals veelal in modelstudies aangenomen wordt, maar zones met een zekere breedte die toeneemt met de spronghoogte van de breuk. De doorlatendheid van breuken is zeer variabel. Het onderzoek heeft uitgewezen dat deze kan toenemen tot een factor 3 van de doorlatendheid van het oorspronkelijke, niet verbroken gesteente of kan afnemen met 3 grootte-orden van de oorspronkelijke doorlatendheid. Breuken zijn nagenoeg niet doorlatend als zij met klei dichtgesmeerd zijn. Veranderingen in de doorlatendheid kunnen in extreme gevallen tot enkele 100-en meters vanaf het centrum van de breukzone traceerbaar zijn.
3. Toepassing van verbeterde, meer realistische compactiecorrecties heeft geresulteerd in gemiddelde uitwendige *stijgsnelheden* die enige tientallen procenten tot een factor 2,5 lager zijn dan de berekende waarden in Fase 1 van het OPLA Programma. De maximale waarde van de berekende gemiddelde uitwendige stijgsnelheid in het Kwartair bedraagt 0,11 mm/jaar voor de pijler Schoonlo (was 0,28 mm/jaar). Onnauwkeurigheden in de dieptebepaling van geologische niveaus kunnen leiden tot fouten van enige honderdsten mm/jaar in de berekende stijgsnelheid.
De maximale waarde van de berekende gemiddelde inwendige stijgsnelheden bedraagt 0,12 mm/jaar; deze waarde is gevonden voor de pijler Pieterburen in het Oligoceen. De feitelijke stijgsnelheid van zoutpijlers kan binnen kortere geologische tijdsintervallen van de genoemde waarden hebben afgeweken. De veronderstelde onnauwkeurigheid waarmee de diameter van de pijler bepaald wordt, resulteert in een minimale en een maximale waarde van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid, die tot een factor 2 van de minimale waarde van elkaar kunnen verschillen.
De waarden van de berekende gemiddelde inwendige en uitwendige stijgsnelheden hebben een vergelijkbaar bereik van grootte-orden (10^{-2} - 10^{-1} mm/jaar).
De berekende gemiddelde inwendige stijgsnelheid heeft een beperkte betekenis voor het voorspellen van de stijgsnelheid op een bepaald moment op een bepaalde plaats in de zoutstructuur.
4. Zoutstructuren in de Noordzee en Noord-Nederland zijn vrijwel zonder uitzondering gekoppeld aan een breuk onder het zout. De zoutstructuur is beter ontwikkeld naarmate de spronghoogte van de breuk in het substraat groter is. De stijging van zoutstructuren vindt vooral plaats in (tektonische) fasen van verhoogde rek- of compressieve spanningen. De directe invloed van deze spanningen op de stijging van zoutstructuren is aanwijsbaar in compressieve fasen (zie ook de resultaten van het project GEO-4A van de VUA). Het mechanisme van de dichtheidsomkering is op zich onvoldoende om zoutbeweging te initiëren.
Bestaande numerieke *modellen van zoutbeweging* kunnen voor het OPLA onderzoek operationeel worden als zij rekening houden met de volgende aspecten:
- brosse vervorming van het afdekpakket (zie project GEO-4A van de VUA);
- de aanwezigheid van een breuk onder het zout.
5. Het onderzoek aan een 6 meter lange boorkern van caprock direct boven het steenzout geeft aan dat er geen opwaarts transport van zout door de caprock heen plaatsgevonden heeft. Transport van vloeistoffen in de onderzochte caprock is naar beneden of subhorizontaal gericht. Met dit aspect dient bij de modellering van zoutoplossing rekening gehouden te worden. Voor de substantiële bijdrage van de RGD in de *modelstudie van subrosie* die te zamen met het RIVM en het IGG uitgevoerd is (het samenwerkingsproject SESAM), wordt verwezen naar het desbetreffende eindrapport.
6. De maximale diepte van erosie door rivieren in de laatste 150.000 jaar bedraagt voor Nederland 20 meter. Resultaten van de *modelstudie naar erosie door rivieren* hebben deze uitkomsten bevestigd. Deze waarde is beduidend lager dan de erosiediepte van 50 meter die in Fase 1 van het OPLA Programma was aangenomen.

Zeer extreme aannames, d.w.z. een zeer lage zeespiegel gecombineerd met een tektonische opheffing, heeft in het model geleid tot een erosiediepte van 100 meter over een periode van 500.000 jaar.
7. Uit statistisch onderzoek aan subglaciaal gevormde depressies dieper dan 100 meter komen aanwijzingen naar voren dat er een relatie bestaat tussen de diepte van dergelijke geulen en de lithologische opbouw van de ondergrond. Deze zou inhouden dat in zandgebieden subglaciaal gevormde geulen gemiddeld ondieper zijn dan in kleigebieden. Voor andere geometrieparameters, zoals de breedte en de lengte van de geulen, is een dergelijke indicatie niet gevonden.
De beperkte kwaliteit van de gebruikte gegevens laat een al te harde conclusie echter niet toe. Dit wordt versterkt door de eerste uitkomsten van de *modelstudie naar erosie onder ijskappen,* waarin de opbouw van de ondergrond een marginale rol lijkt te spelen.

Conclusies betreffende de nadere groepering van zoutvoorkomens

1. In totaal zijn 45 zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland geïdentificeerd; in Fase 1 waren dit er nog 38. Het grotere aantal is grotendeels het gevolg van het gebruik van nieuwe, meer nauwkeurige informatie van de ondergrond van Nederland. In de groep van 45 zoutvoorkomens zijn 15 pijlers, 28 kussens en 2 gebieden met gelaagd zout onderscheiden.
2. Indien nog steeds de uitgangspunten van Van Hattum en Blankevoort in 1986 zouden worden gehanteerd, past de opbergmijn waarschijnlijk in 7 zoutlichamen; 23 voorkomens zijn waarschijnlijk te klein of liggen te diep en voor 13 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. Het opbergontwerp voor droge cavernes in combinatie met diepe boorgaten past waarschijnlijk in 2 zoutlichamen; in 33 zoutvoorkomens is deze optie waarschijnlijk niet uitvoerbaar en voor 8 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. De constructie van natte cavernes in combinatie met diepe boorgaten is waarschijnlijk mogelijk in 19 zoutvoorkomens; in 9 voorkomens is de aanleg waarschijnlijk niet mogelijk en voor 15 voorkomens is het onzeker. Voor twee zoutvoorkomens in de ondergrond van Nederland was het door het ontbreken van voldoende relevante gegevens niet mogelijk de inpasbaarheid van de opbergontwerpen te evalueren.
Deze groepering verschilt op onderdelen van die in Fase 1 omdat nieuwe ruimtelijke gegevens zijn gebruikt, de onzekerheden in de gegevens meegenomen zijn en de opbergontwerpen zonder flexibele dimensies toegepast zijn.
De uitkomsten van deze groepering zijn van *voorlopige* aard daar een definitieve uitspraak over de inpasbaarheid pas gegeven kan worden als het inwendige van een of meerdere zoutvoorkomens in een eventuele volgende fase is onderzocht.
3. Van de thans onderscheiden zoutlichamen liggen er waarschijnlijk 23 te diep om door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar te worden beïnvloed, terwijl 9 zoutvoorkomens wel door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar zouden kunnen worden aangesneden. Voor 7 zoutvoorkomens is de onzekerheid in de basisgegevens te groot om een conclusie te trekken. Voor 6 voorkomens is de evaluatie helemaal niet mogelijk omdat een deel van de relevante gegevens ontbrak.
Afwijkingen van een vergelijkbare groepering in het project Vervolg GEO-1 zijn veroorzaakt door het gebruik van nieuwe kaartinformatie en het in de groepering betrekken van de onzekerheden in de dieptewaarden.
Deze groepering is alleen op geologische overwegingen gebaseerd en doet *géén* uitspraak over de consequenties in veiligheidstechnische zin. Daarvoor is een samenhangende en meer complete benadering vereist. De uiteindelijke betekenis van ijstijdeffecten voor de veiligheid van opgeborgen radioactief afval kan pas worden vastgesteld als de aangereikte geologische overwegingen in een toekomstige veiligheidsstudie geanalyseerd zijn.

Aanbevelingen

1. Het GEO-1A onderzoek heeft onder meer tot resultaat gehad dat de contouren voor een *tijdsafhankelijk geologisch barrièremodel* zijn geschetst. In operationele vorm zal dit model in kwantitatieve zin de mogelijke opeenvolgende toestanden van het geologische barrièresysteem beschrijven, die onder invloed van geologische processen zoals erosie, subrosie en zoutbeweging kunnen veranderen. Aanbevolen wordt om dit model verder te ontwikkelen en te operationaliseren.

2. De beperkte aardwetenschappelijke expertise op het gebied van mogelijke opberggesteenten, waaronder steenzout, in Nederland mag na beëindiging van het onderzoek in het OPLA Programma - Fase 1A niet wegvallen. Aanbevolen wordt derhalve om een *team van Nederlandse deskundigen* op het terrein van opberggesteenten te formeren en in stand te houden. Dit team zal de reeds opgebouwde dan wel op te bouwen kennis op het gebied van gastgesteenten, zoals steenzout en klei, in het algemeen en in Nederland in het bijzonder onderhouden en relevant nieuw onderzoek op dit terrein uitvoeren. In een dergelijk multidisciplinair team op het terrein van potentiële gastgesteenten dient plaats te worden ingeruimd voor expertise op het terrein van bureau-, lab- en computer-onderzoek, o.a. betreffende hydrogeologie en de modellering van het barrièregedrag. Voorts dienen geologische aspecten van terughaalbaarheid in het programma van onderzoek betrokken te worden.
3. Om de effecten van geologische processen op de ondergrond van Nederland in de komende 100.000 jaar op een betrouwbare en kwantitatieve wijze te kunnen voorspellen, is veldonderzoek noodzakelijk. Het verdient aanbeveling om, zoveel mogelijk in aansluiting op Fase 1A, een gedegen studie naar de opzet en mogelijke uitvoering van toekomstig veldonderzoek te verrichten. Bij deze bureaustudie zou de nadruk dienen te liggen op een *integrale aanpak* van het veldonderzoek waarbij *samenwerking tussen diverse betrokken onderzoeksinstellingen en bedrijven* voorop staat.

Extended summary

Contents

Status of RGD studies within the OPLA Programme *XXIX*

Geographical and geological synopsis of the study area *XXX*

Framework of the current project *XXX*

Present condition of geological barriers *XXXII*
- **Reliability analysis of geological data** *XXXII*
- **Supplementary inventory of geological data** *XXXII*
- **Development of a geological computer database** *XXXIII*
- **Hydrogeological characteristics of Mesozoic rocks near salt bodies** *XXXIV*
- **Hydrogeological characteristics of faults** *XXXIV*

Processes affecting future conditions of geological barriers *XXXV*
- Salt movement *XXXV*
- Case studies of the structural development of salt bodies *XXXV*
- Improved methods for calculating rise rates *XXXV*
- Modelling studies of salt movement *XXXVI*
- Aspects of internal anatomy of salt bodies *XXXVII*
- **Caprock formation and salt dissolution** *XXXVII*
- Case study of caprock architecture and genesis *XXXVII*
- Modelling studies of salt dissolution *XXXVIII*
- **Fluvial and subglacial erosion** *XXXVIII*
- Fluvial erosion in relation to changes in sea level and land surface level *XXXVIII*
- Modelling studies of fluvial erosion *XXXIX*
- Subglacial erosion with special reference to the subsurface configuration *XXXIX*
- Modelling studies of subglacial erosion *XXXIX*
- **Feasibility of developing a geological barrier model** *XXXIX*
- Prerequisites for the development of a barrier model *XXXIX*
- Evaluation of existing models *XL*
- Feasibility of developing a geological barrier model *XL*

More detailed grouping of the salt bodies in the subsurface of the Netherlands *XLI*
- Introduction *XLI*
- Inventory of the salt bodies *XLI*
- Grouping on the basis of the suitability to accommodate repository designs *XLII*
- Grouping on the basis of the expected future geological stability of the salt bodies *XLII*

Implications for the safety study *XLIII*

Conclusions and recommendations *XLIII*
- Conclusions concerning reliability analyses *XLIII*
- Conclusions concerning the more detailed grouping of the salt bodies *XLV*
- Recommendations *XLV*

Status of RGD studies within the OPLA Programme

The studies for project GEO-1A, which are reported here, are part of Phase 1A of the national research programme concerning the geological disposal of radioactive waste in the subsurface of the Netherlands (the OPLA Programme). A proposal for this multi-phase programme was submitted by the OPLA Committee in 1984. In 1985 the Dutch Parliament approved the realisation of Phase 1 of the research programme. The OPLA committee reported on the Phase 1 studies in 1989. Phase 1A is a continuation of Phase 1.
The original proposal focused primarily on the use of rock salt as host rock. Large massive bodies of Zechstein rock salt occur in the subsurface of the northern and eastern parts of the Netherlands.

The main objective of geological disposal of radioactive waste in the subsurface is to isolate this waste from the population and the environment for as long as the release of the radionuclides into the biosphere would generate unacceptable risks. Risk analysis is the subject of a safety study, the principal theme of the OPLA Programme. This safety study is supported by a number of more detailed, specialised studies in various fields: hydrology, geology, rheology, and mining engineering.

Three interacting systems can be discerned in the safety analysis, e.g. the barrier system, the fluid system and the radionuclide system. Each supporting discipline refers to one or two of the three systems. The earth science research reported here focuses in particular on the natural conditions of geological barriers. A geological barrier is defined as an *in-situ* rock or sediment capable of immobilising radionuclides or retarding the migration of radionuclides. These natural materials typically have high sorption capacities and/or low permeabilities and porosities.

The main responsibilities of the Geological Survey of the Netherlands (RGD) in the OPLA Programme were to describe and predict the present and potential future conditions of the geological barriers. The present condition of the barriers can be derived directly from field observations (data studies). The RGD proceeded as follows in predicting potential future conditions of geological barriers. The first step was to study the processes that affected the barriers in the geological past (process studies). An attempt was made to include all relevant, known processes in the study. A first indication of possible future development can be given by extrapolating observed effects of processes from the past into the future. However, a trend observed in the past does not necessarily extend into the future. The scientific basis for predictions of the future can be considerably broadened by developing a thorough understanding of the physical and chemical mechanisms of these processes. A better understanding of the mechanisms can be gained with the help of physico-chemical computer simulations (modelling studies). Modelling studies depend on suitable field data being available for verification of the simulation results. This type of research is at present in an early phase of development. Modelling studies should be carried out separately for each relevant process. Those processes that directly affect the extent of the barriers merit particular consideration, e.g. salt movement, dissolution and erosion.

The main long-term objective of the geological research in the OPLA Programme was to develop a geological barrier model which can be used to predict the combined, time-dependent effects of relevant processes on the condition of geological barriers during successive times in the future. To adapt such a model to the available computing capacity it must be based on simplified versions of the stand-alone models of the various processes. The barrier model is intended as support or ideally as a component of the safety study, in particular in delineating and differentiating natural release scenarios.

The objective of Phase 1 of the OPLA Programme was to determine whether radioactive waste can be safely stored in rock-salt formations that occur in the subsurface of the Netherlands.
The investigations in Phase 1 were of a fundamental, generic nature and precluded field work in the northern and eastern parts of the Netherlands. The field data used in the OPLA Programme have not been obtained specifically for the purpose of this programme.

Before the start of Phase 1A, RGD's main contribution to the OPLA Programme was the preparation of an inventory of all relevant, publicly available geological information and data on the northern and eastern parts of the Netherlands (data studies). A general interpretation was given of the geological evolution of the area, in particular of the existing salt bodies. Geological processes that may influence the future stability of salt bodies and overburden were identified and described. Special emphasis was put on glacial and periglacial processes. The RGD published two reports on these studies in 1989 and 1990.

Geographical and geological synopsis of the study area

The study area covers a large part of the northern Netherlands: the provinces of Groningen and Drenthe, the northern part of the province of Friesland and the regions Twente and the Achterhoek. Massive bodies of rock salt with thicknesses of up to 3000 metres are present in the subsurface of this area. This potential host rock for radioactive waste was deposited in thick layers about 220 to 250 Ma ago (the Zechstein period) by precipitation from an evaporating, closed or semi-closed marine basin. During various evaporative cycles, rock salt precipitated as well as other salts including carbonates, sulphates and Potassium and Magnesium salts. In the period following the Zechstein, once the evaporites had been buried by over 500 metres of younger sediments, the flat-lying salt started to flow at several places in the subsurface of the Netherlands, often as a result of fault movements in the underlying sequences. In many locations this resulted in the formation of salt pillows or, if the overburden was breached, in salt plugs. These days, the tops of the shallowest salt plugs extend as high as about 100 metres below the surface. The undisturbed, bedded salt is situated generally at a depth of several kilometres below the surface.

Framework of the current project

On the basis of the recommendations in the final report of Phase 1 and the comments of the international review committee to this report, two main objectives were formulated for Phase 1A. The following two objectives of the GEO-1A project are directly derived from the Phase-1 objectives:
1. To determine and - if possible - to improve the reliability of the descriptions of the present and potential future conditions of the geological barriers. These reliability factors concern (hydro)geological data, the effects of (hydro)geological processes and the results of (hydro)geological modelling studies.
2. To group the salt bodies in the subsurface of the Netherlands for the purpose of any future field studies in a possible following phase of the OPLA Programme. Such a grouping should be tailored to evaluating the various designs for a disposal facility and reflect the expected future geological stability.
Furthermore, the OPLA Committee has advocated participation in international research activities in the field of radioactive-waste disposal.

Concerning the descriptions of the present conditions of the geological barriers, a major effort was directed at the analysis of the uncertainties of available mapping data, i.e. depth maps for the top of the Zechstein and for the base of the Tertiary.
A supplementary inventory of data on the shallow subsurface was prepared. This study focused on the interval between 10 and 500 metres deep, in particular on borehole data from the overburden around some shallow salt bodies. These holes had not been drilled specifically for the OPLA project, however. The growing database necessitated the development of a simple computer program for filing and handling geological data and information. Such a system facilitates the verification of research results in the current project and enabled a more efficient and consistent realisation of any future studies.
Two research topics concerning the present condition of the geological barriers were based on information from outside the study area. Hydrogeological anomalies of Mesozoic rocks near salt bodies were evaluated using well logs and other well data from a selected region in the North Sea. Worldwide literature examples have been collected to gain a better understanding of the hydrogeological characteristics of faults.

For the study on potential future conditions of geological barriers three processes were selected that may affect the future conditions of the barriers directly. These are: salt movement, salt dissolution (including caprock formation) and erosion. The feasibility of developing a geological barrier model was the subject of a separate study.

Salt movement

The geo-mathematical method for calculating rise rates of salt bodies was refined and applied to some salt bodies in the subsurface of the Netherlands and the North Sea. The sensitivity of the calculated rise rates to variations in input parameters was studied.
The structural-geological development of a number of salt bodies in the subsurface of the North Sea and the northern parts of the Netherlands was evaluated using recently published maps, as well as seismic and borehole data, none of which were gathered specifically for the OPLA Programme. The modelling study of salt movement was carried out as a separate part of the project. Information and know-how on salt movement were exchanged with the parallel project GEO-4A that focuses on modelling salt movement in relation to intra-plate stresses (Amsterdam Free University).
Furthermore, the internal structure of salt bodies was studied using cores from the Gorleben salt dome in Germany and during field studies and field trips to exposed salt bodies in Spain and Iran.

Subrosion

A literature study contributed to the understanding of the physico-chemical mechanisms of salt dissolution (subrosion). Subrosion directly results in the formation of caprock which consists of the less soluble components of the Zechstein evaporites. A case study of a 6-metre-long core from the caprock provided significant information on the structure and origin of this rock and on the very process of dissolution.
There was a close link between the research on salt dissolution and the joint project SESAM on site-specific groundwater studies, realised in co-operation with the National Institute of Public Health and Environmental Protection and TNO-Institute of Applied Geoscience. Partly parallel to the joint project is the EC project on the consequences of long-term climatic changes on the groundwater system and subrosion. Some of the results of the GEO-3A project on the genesis and composition of caprock (by Groundcontrol) were used for this theme.

Erosion

Two types of erosion were investigated, i.e. fluvial and subglacial erosion. A general literature study focused on the connection between fluvial erosion and changes in sea level and surface level. A modelling study was carried out to gain a better understanding of the potential effects of fluvial erosion on the surface of the Netherlands.
Research on subglacial erosion focused in particular on the connection between the depth of depressions that formed underneath the ice caps and the composition of the shallow subsurface. Development of a model for subglacial erosion commenced.

Barrier model

The main thrust in the study of the future behaviour of geological barriers was the feasibility study into the development of a geological barrier model. Advice from BRGM in France, Dames & Moore in Great Britain and Stanford University in the United States was used in this feasibility study.

More detailed grouping

The results of project GEO-1A formed the basis for the more detailed grouping of the salt bodies in the subsurface of the Netherlands. Two grouping exercises were carried out, one designed to assess the potential suitability of salt bodies for accommodating repository designs and one on the basis of the expected future geological stability of the salt bodies.

Contacts with other research institutes

In the course of project GEO-1A the Geological Survey of the Netherlands has cooperated with a large number of research institutes in the Netherlands and abroad. To intensify the contacts with the project

on the Gorleben salt dome, the RGD seconded a geologist to the Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Germany.

Constraints

A major constraint in realising the GEO-1A and earlier OPLA studies, has been the availability of data on the subsurface of the northern and eastern parts of the Netherlands. A condition was that the researchers could only use existing, publicly available data, as well as basic data gathered and reports published by the RGD itself.
Another constraint was the fact that *no* field studies were to be carried out as part of the OPLA Programme in the northern and eastern parts of the Netherlands.

Present condition of geological barriers

Reliability analysis of geological data

The reliability analysis focuses on the spatial geological data that are generally available for the OPLA Programme. In particular, the subsurface depths of geological horizons as represented on contour maps and cross-sections were assessed. Such an analysis had not yet been carried out during Phase 1 of the OPLA Programme.

This analysis took the following approach: various sources of errors can be blamed for the eventual difference between the observed and actual depth of a particular horizon. These errors may have been introduced during the acquisition of basic field data (borehole data and seismic reflection data), during processing and interpretation of these data or during compilation of contour maps and cross-sections. Statistical quantification of the error sources that had been identified involved calculating the standard deviation of the differences between the actual and observed depth data. In most cases determination of this value had to rely on a best estimate on the basis of an expert opinion.
The maps of the top of the Zechstein and the base of the Tertiary that were available for Phase 1 were analyzed. These were compared with more recent maps that had since become available as a result of the routine mapping of the deep subsurface. An interpreted version of a seismic line through the northeastern part of the Netherlands, published by the Geological Survey of the Netherlands in 1990, could also be used in the reliability analysis.

Borehole data and seismic reflection data have both been used for compiling the maps. Borehole data are more reliable. The standard deviation of the interpreted depth is estimated to be 2 metres. The depth data interpreted from seismic reflection data are less reliable; the standard deviation of the interpreted depth can be as high as 125 metres. In compiling contour maps, interpolation of the original data may introduce another source of errors. The magnitude of the error resulting from the mapping process itself increases with increasing distance from the data points and with the structural complexity of the geological horizon mapped. Using the expertise thus acquired of the reliability of mapped horizons and some other assumptions it was possible to compile depth maps showing the local standard deviation of the depth error for these horizons.

Supplementary inventory of geological data

During Phase 1 of the OPLA Programme a comprehensive inventory of geological data on the subsurface of the northern and northeastern parts of the Netherlands was prepared. However, even the inventory on the uppermost 500 metres of the subsurface is not as yet comprehensive, although a considerably larger number of basic data was available on this part of the subsurface than on the deep subsurface.

To optimise our knowledge of the available data an additional inventory and evaluation was prepared of basic data on the interval between 10 and 500 metres below the surface in the neighbourhood of some shallow salt bodies in the Netherlands. These basic data involved shallow auger data, borehole

data, cone penetration data and hydrogeological data. All these data were evaluated in terms of their quantity and quality.

For this inventory those salt bodies were selected of which the tops, according to Phase 1 data and the seismic line mentioned above, are located at depths of less than 1000 m. For each salt body an area was delineated, which comprises the salt body itself and its salt-depletion area.

Out of a total of 1036 moderately deep boreholes listed, 790 were described in sufficiently detail to warrant a stratigraphical interpretation. For 440 of these a stratigraphical interpretation was not available at the time of the inventory. The average spacing of those moderately deep holes that are suitable for a stratigraphical interpretation, is one borehole per 1.6 km^2. However, the moderately deep boreholes are generally not uniformly distributed over the areas. The number of boreholes which continue below a depth of 50 metres rapidly decreases. The average geographical density of boreholes that reach depths between 50 and 100 metres is one borehole per 5.1 km^2, and of boreholes that go deeper than 100 m it is one borehole per 11.4 km^2.
Fifty five boreholes have a suite of various well logs; among these were 22 holes that went deeper than 500 metres. These deep holes are located near the diapirs Pieterburen, Zuidwending and Winschoten.
Cone penetration tests and geohydrological data have a low geographical density and contribute little to the overall database.

For four of the nine salt bodies a larger than average amount of data is available. This concerns the Anloo, Zuidwending, Winschoten and Onstwedde structures. Fewer than average data are available around the salt structures Ternaard, Pieterburen, Hooghalen, Schoonlo and Gasselte-Drouwen.

Development of a geological computer database

Since the geological studies in the OPLA Programme began, the amount of data gathered has increased considerably. To obtain a better overview of the many versions of various maps in different formats an automated database was required. A database enables differentiation between original point data and interpolated data. It offers better possibilities to verify research results and will enhance the efficiency and consistency of any future research activities.
The database is only averaget for storing and handling interpreted data. Basic seismic and borehole data which are easily accessible in other databases, have not been stored in the OPLA database. The database can be used for various applications both in- and outside the system, e.g. for compiling contour maps, mathematical and statistical analyses, pre-processing of modelling input and graphical presentation.

Several types of data can be distinguished, i.e. point data (e.g. boreholes), line data (e.g. contours and faults) and grid/raster data (e.g. interpolated data for modelling input). In preparing the present database, storage and processing of contour data was emphasized.

The core of the system consists of a relational database (dBASEIV) and a geographical information system (ILWIS). Each map is stored as a separate file, which can be imported in ILWIS. Summaries of available maps have been filed complete with extensive background information in tables that are accessible in both dBASEIV and ILWIS. Borehole data are also stored as tables. All map files and tables are stored in a logically constructed directory structure.
Conversion programs have been written that enable data exchange with other software programs that are in use at the Geological Survey, such as the GIS Arc/Info, software for map contouring (ZYCOR) and for graphical presentation (CorelDraw).

A large number of contour maps is stored in the system already, e.g. topographical maps, maps showing hydrogeological units, and a location map of salt bodies. Databases on the characteristics of salt bodies in the Netherlands, of moderately deep boreholes and of published information on the

depth of the top Zechstein in various deep boreholes are also on file in the form of tables. This information has been combined in various ways and is presented graphically.

Hydrogeological characteristics of Mesozoic rocks near salt bodies

The special objective of this part of the programme is to find potential anomalies in the hydrogeological characteristics of Mesozoic rocks near salt bodies. These studies make use of well logs and other information from boreholes in selected areas in the North Sea, which are geologically comparable with the northern part of the Netherlands.
Two processes that may affect the permeability of Mesozoic rocks near salt bodies were evaluated. To this end a number of rock units was selected that are also found close to salt bodies in the Netherlands and that have previously shown evidence of the presence of hydrogeological anomalies.

Firstly, the potential increase in permeability in the Chalk Group in the Dutch sector of the Continental Shelf north of latitude 53°40' was evaluated. The Chalk Group was selected because this unit is encountered overlying many salt bodies. The ascent of the salt bodies and the associated extensional stresses in the sedimentary overburden may lead to faulting and fracturing, frequently resulting in a permeability increase. Karstification may further enhance the permeability if the fractured Chalk is situated at shallow depth. Losses of drilling mud may indicate an increase in permeability. However, in none of the 64 well descriptions evaluated was any mention made of losses of drilling mud in the Chalk Group in the vicinity of salt bodies.

Secondly, the potential reduction in permeability as a result of salt precipitating in the pores of the rocks was studied.
A model was developed which enables the identification of the presence of halite as cement. The model uses well-log data, such as spectral gamma-ray data and density-log data, as input. Unfortunately the model cannot be applied in sequences that also contain lignite (an organic rock). The model has been applied successfully to two sandstone sequences in Block L2 of the Dutch sector of the Continental Shelf, which also occur in the northern part of the Netherlands. Both sandstone sequences, the Volpriehausen Sandstone and Detfurth Sandstone Members, are well-known reservoir rocks. The analysis of the Volpriehausen Sandstone Member demonstrated that salt cement may be present as far as a few hundreds of metres distance from the salt body. The maximum reach of the observed salt plugging is less than 1.5 km. The Detfurth Sandstone Member also showed traces of salt plugging. However, this is attributed to either primary origin or to early enrichment by influx from the overlying Röt salt deposits. The results of future research on this topic could be improved significantly by using sophisticated petrophysical logging technology in boreholes.

Hydrogeological characteristics of faults

An extensive study of published literature concerned the hydrogeological characteristics of faults in the upper few kilometres of the subsurface.
The width of the planar fault zone depends on the throw of a fault. A width-to-throw ratio of 1:100 may be used as a guideline. The width of a fault zone decreases with depth as a result of a change in deformation mechanism. Faults are often irregular in shape and may be segmented both horizontally and vertically. The throw of a fault may vary within a single fault.
The permeability perpendicular to the fault plane is determined by the permeability of the rocks on either side of the fault. The most important parameters for this lateral fluid flow are the throw, the thickness ratio of water-bearing and impermeable beds and the orientation of the water-bearing beds. The permeability of the fault zone itself is determined by the properties of the faulted rock and by the width and continuity of the fault zone.
Under low confining pressure, dilatation in the fault zone may cause an increase in permeability as large as 300% in the central part of the fault zone. This increase gradually tapers off laterally to the permeability of the unfaulted rock over a few hundreds of metres.
At higher confining pressures cataclasis will take place. Cataclasis may result in a permeability

increase (brecciation) or decrease (gouge formation). A porosity decrease of 50% and an associated permeability decrease of 25 to 75% to even 3 orders of magnitude are possible.
Mechanical processes, such as clay smearing or clay injection, will always reduce the permeability. A clay percentage of 25% is sufficient to make a fault virtually impermeable.
Fault segmentation can occur in alternating competent and incompetent rock sequences and will affect permeability negatively. Diagenetic processes such as new growth of clay minerals, will also reduce the permeability of the fault zone.

Processes affecting future conditions of geological barriers

Salt movement

Case studies of the structural development of salt bodies

The description of the regional geology of the northeastern part of the Netherlands and of the salt bodies that occur in that region was updated with recent information. This recent information concerns seismic lines across the salt diapirs Klein-Ulsda, Onstwedde and Gasselte-Drouwen, published by the RGD in 1990. The anatomy of the Ternaard and Gerkesklooster structures was updated with information of Map sheet II of the Geological Atlas of the Deep Subsurface of the Netherlands.

In contrast to the onshore area, basic seismic reflection data and borehole data were available to study the subsurface salt structures below the North Sea. The data are based on a seismic survey by Nopec/Geco-Prakla, which comprises a grid of approximately 2000 km of seismic lines. The study on the northern part of the Dutch Continental Shelf has produced a detailed characterization of salt movement and a geographical subdivision of this area. The geological architecture of this North Sea area in general resembles that of the northeastern part of the Netherlands. Therefore the conclusions obtained from the North Sea study are assumed to apply to the northeastern part of the Netherlands as well.

The locations of the salt structures in the studied part of the North Sea are, almost without exception, related to one or more faults in the basement below the Zechstein. Movement along these faults enables the upward flow of salt because it weakens the overburden and creates differential stresses in the salt as a result of differential loading. The buoyancy force combined with the density inversion alone, seems insufficient to overcome the strength of the overburden. This study has shown a connection between the occurrence of regional deformation phases and the increased intensity of salt movement.
Faulting is the mechanism triggering salt movement. The larger the throw of the basement fault, the better the salt structure will develop. The strike trends of the faults underlying the Zechstein are reflected in the orientations of the overlying salt bodies.
This relationship exists not only in the North Sea but also in northern Germany. On the basis of the stage of development of the salt structures a geographical subdivision of the Dutch sector of the Continental Shelf was made. This corresponds with the structural-geological subdivision of the same area. A similar subdivision has been prepared for the northeastern part of the Netherlands.

Safety studies that focus on time scales of millions of years will have to take into account the intensified salt movement that results from an increase in tectonic activity.

Improved methods for calculating rise rates

The methodology for calculating rise rates of salt bodies was improved and applied to a number of cases in the Netherlands and below the North Sea.
A correction factor for syndepositional compaction (syn-correction) of the sequence studied, which was applied in Phase 1 studies could be omitted on theoretical grounds. Furthermore, the correction

factor for compaction of the sediments underlying the sequence studied (pre-compaction) was also applied to compaction in Mesozoic rocks. Neglecting the compaction corrections can result in errors as high as double the values calculated using the compaction corrections.

This improved method has resulted in a more accurate calculation of the average internal and external rise rates.
Average external rise rates are several tenths of percents to 2.5 times lower than the values calculated during Phase 1 of the OPLA Programme. The calculations were performed for a number of salt bodies in the northeastern part of the Netherlands and in the M Blocks in the Dutch sector of the Continental Shelf. The calculated values for the average external rise rates range from -0.04 to 0.06 mm/y. The Schoonlo diapir shows an anomalously high external rise rate of 0.11 mm/y. In the Phase 1 calculations this was still calculated at 0.28 mm/y.
In general, the average internal rise rates of the Dutch onshore salt bodies were 3-5 times higher during the Early-Middle Oligocene than during the Late Tertiary and Quaternary. The Oligocene coincided with a period of increased tectonic activity. The difference in average rise rates between the two geological periods confirms the assumed relationship between accelerated salt movement and increased regional tectonic activity.

The inaccuracy in the estimates of the cross-sectional area of a salt body resulted in minimum and maximum values of the average internal rise rates which may differ up to a factor 2.

The data available for offshore salt bodies only permitted the calculation of average rise rates for other geological periods. Here, average rise rates for the Late Cretaceous and Tertiary were calculated. These long periods include various tectonically active periods and periods of relative stability. The values calculated for the average internal and external rise rates are of the same order of magnitude (10^{-2} - 10^{-1} mm/y), with maxima of 0.11 mm/y for the average external rise rate and 0.12 mm/y for the average internal rise rate. The calculated rise rates are in accordance with values published for the European Permian Basin.
This study did not enable a statement to be made on the total amount of salt that has disappeared as a result of dissolution and erosion.

Modelling studies of salt movement

A literature review of the various models for salt movement was carried out. These include analytical models (linear stability analysis), experimental models and numerical models. Experimental models permit geometrical, kinematical and - to a certain extent - dynamical approximations of reality. This type of model gives relevant information in three dimensions. With reference to the objectives of the OPLA Programme, the main disadvantages are the lack of quantitative results, the uncertainties in translating the scale of the experiments to the actual scale and the limited flexibility of the experimental models.
The linear stability analysis predicts the effect of gravity on the growth rate and spacing of salt bodies. This analysis is only valid for the very first (linear) deformation of a salt body. The linear stability analysis is useful for testing software for numerical models.
Numerical models are the most realistic models. The advantage of these models is that parameters such as pressure, temperature and stress can be calculated at any point in space or time throughout the model. Recent numerical models include sedimentation, erosion, topographic effects, a depth-dependent density and viscosity of the sediment and a realistic rheological model of salt. The models are accurate.
However, the existing numerical models have their limitations for applications in the OPLA Programme because:
- the rheological description of the overburden is not complete and
- basement faulting is not incorporated.

The rheological model developed at the Amsterdam Free University (project GEO-4A) is a suitable basis

for including plastic and brittle behaviour of different types of rocks. Faulting in the basement and erosion can be incorporated by using (flexible) boundary conditions. The modelling studies will have to be evaluated by comparing the result with field data on salt movement in the geological past.

Aspects of the internal anatomy of salt bodies

Phase 1 of the OPLA Programme has shown that little is known of the internal anatomy of salt bodies in the Netherlands. Project GEO-1 carried out by the RGD in this phase, gives an indication of the internal anatomy on the basis of the regional configuration of the Zechstein deposits in the Netherlands, complemented with some well-documented examples from Germany. To increase our knowledge of the internal anatomy, field work and field trips took place to exposed salt bodies in Iran and Spain and rock-salt cores from the Gorleben diapir (Germany) were examined.

In Iran, a number of diapirs in two different regional-tectonic settings were studied. The diapirs visited in the Zagros Mountains were formed as a result of regional tectonic activity, whereas the diapirs in the Dasht-i-Kavir developed under relatively stable tectonic conditions.
The outcrops of the Cardona salt diapir (Spain) provide an outstanding example of the internal structures in the core of a diapir at different scales, from centimetres to several hundreds of metres. Examination of a number of cores from the Gorleben diapir revealed decreasing crystal sizes with increasing deformation. Many primary structures had been fractured. Carnallite inclusions, probably formed after deposition of the rock salt, indicate migration of brine.

Caprock formation and salt dissolution

Case study of caprock architecture and genesis

A 6-metre-long core from the lowest part of the caprock of the Zuidwending salt dome was available for detailed petrographic and geochemical analysis.

A number of geochemical techniques were applied to obtain a continuous analysis of the chemical composition of the core (Induced Coupled Plasma and X-Ray Fluorescence techniques). On the basis of this analysis, samples were selected for more detailed compositional analyses (Instrumental Neutron Activity Analysis). In addition Sr, O, H, S and U-Pb isotope analysis was carried out. Furthermore, 100 thin sections of the core were cut for petrographic description. Three levels of the core were tested for traces of remnant magnetism.

From top to bottom, the core comprises 3 metres of gypsum, 2.5 metres of anhydrite and half a metre of gypsum sand. Veins in the anhydrite (open and closed) have a predominantly sub-horizontal orientation. The lowest 50 cm of the core is composed of homogeneous coarse-grained, poorly consolidated gypsum sand.
The transition from gypsum to anhydrite at three metres above the base is visible as a sharp break. Trace elements are concentrated preferentially in the anhydrite section. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio decreases down the core. δD values are more or less constant in the samples furthest from the salt surface and become progressively more negative approaching the salt surface. The change in values is about 12 . The $\delta^{18}O$ ratio shows no clear trend down the core with values ranging between -4 and -7 . The $^{207}Pb/^{204}Pb$ and $^{208}Pb/^{204}Pb$ ratios show clear positive trends, i.e. becoming more radioactive with increasing depth. $^{206}Pb/^{204}Pb$ and $^{238}U/^{204}Pb$ ratios fail to show any correlation, which in the case of uranium can be attributed to the reliability of the method of analysis. Remnant magnetism signals were below the detection limit of the magnetometer used.

The composition of the lowermost part of the caprock provides evidence of the low salinity of the dissolving brine. From the texture of the caprock it could be concluded that locally fluid flow was predominantly sub-horizontal. The lack of a vertical chemical gradient in the gypsum part of the caprock is a convincing argument against any salinity gradient in the water in the caprock. Diffusion

processes must therefore be regarded as irrelevant.

Modelling studies of salt dissolution

On the basis of existing literature, the processes and parameters that affect dissolution (subrosion) of salt bodies in the Netherlands were studied as well as the extent to which these aspects had already been incorporated in existing models or would have to be included later. Within the OPLA Programme dissolution is currently simulated in the Metropol-3 model of the National Institute of Public Health and Environmental Protection (see final report of the joint project SESAM).

In the Metropol-3 model, caprock, salt surface and salt body are modelled as one unit. Upward transport of salt through the caprock is assumed to occur by diffusion.

The dissolution of salt plugs is primarily controlled by:
- the amount of solvent available per time unit,
- the dissolution rate, and
- the solubility of minerals present in the salt plug.

In turn, these parameters are controlled by a complex set of other, frequently interrelated parameters such as temperature, pressure, fluid composition and the permeability of the surrounding sediments. The effects of temperature and pressure on dissolution rate and solubility are well-known from literature. Dissolution rate as well as solubility increase with temperature and fluid flow velocity. Fluid flow velocities in aquifers in the northeastern part of the Netherlands decrease rapidly with increasing depth. Because the effect of the reduction in fluid flow velocity is far more important than the effect of increasing dissolution rates and solubilities, subrosion rates of salt diapirs in the Netherlands will rapidly decrease with increasing depth.
Existing subrosion models can be further developed on the basis of this knowledge. A more detailed hydrogeological model of the direct vicinity of the salt surface would be a major improvement. Rock salt, salt surface and caprock have to be considered as separate hydrological units. A physico-chemical module for salt dissolution may considerably improve the subrosion model as well. Provided these enhancements are implemented, Metropol-3 should provide the best possibilities for accurate simulation of dissolution.

Fluvial and subglacial erosion

Fluvial erosion in relation to changes in sea level and land surface level

This part of the project focuses on the processes and process interactions that determine fluvial erosion, and their possible effects on the subsurface. Erosion and sedimentation by rivers are the results of a complex set of interacting processes, the most important of which are sea-level fluctuations, tectonic movements and climatic variations. In addition, and depending on the space and time scales used, river systems are controlled by a number of parameters, which will not be described in detail here.
This complex interaction between processes and parameters dominating the fluvial system, has been described on various relevant space and time scales.

Examination of deposits dating from the Late Quaternary shows that in those parts of the Netherlands with a relatively flat gradient (20-25 cm/km) rivers never incised deeper than 20 metres below the palaeo-surface. Uplift, such as occurred in Limburg during the Quaternary, coinciding with a low sea level may result in deeper fluvial incision.
Under conditions similar to the late Quaternary it is unlikely that future fluvial vertical erosion will directly affect buried salt bodies.

Modelling studies of fluvial erosion

The FLUVER model which was developed for this study, corroborates the observations in the preceding section on fluvial erosion. FLUVER is a finite-state model that simulates the evolution of a fluvial landscape, controlled by relief, climate, tectonics and changes in base level as a result of sea-level fluctuations over the past 500,000 years. Four simulations have been run which, independent from the results of the desk study, show that vertical fluvial erosion is strongly controlled by fluctuations in sea level and land surface movements.
Over a period of 500,000 years, assuming an average maximum subsidence rate of 0.01 mm/year, the model predicts a maximum lowering of the erosion base level of less than 20 metres. Deeper incision (between 20 and 100 m) can only be expected at very low sea levels combined with tectonic uplift. This combination is not a realistic assumption for conditions in the northern part of the Netherlands.

Subglacial erosion with special reference to the subsurface configuration

The study on subglacial erosion builds on the results of the GEO-1 continuation study on this subject. Deep depressions developed in a wide zone in NW Europe during the Elsterian glaciation. The depressions which have since been filled in have the following characteristic dimensions: depth from 50 to 450 metres; width from 1 to 10 km; spacing from 9 to 13 km and a length up to 200 km. The relationship between these dimensions and the configuration of the subsurface has been statistically analyzed. Five areas were selected for this analysis: the northern part of the Netherlands (sandy subsurface); northern Germany (sandy and clayey subsurface areas), the North Sea (sandy and clayey subsurface areas). A basic assumption in the statistical analysis has been that characteristics for sandy and clayey areas do not differ.
Except for the depth parameter no significant relation between the spatial parameters of the deep Elsterian depressions and the subsurface lithology could be demonstrated. However, the poor quality of the available data did not permit a firm confirmation or rejection of this relationship.

The origin of the deep Elsterian depressions can be explained by either of two genetic models: a catastrophic model of sudden meltwater erosion, and a steady-state model of combined kinematic glacial erosion and progressive subglacial meltwater erosion. The second model seems to be the most likely.

Modelling studies of subglacial erosion

Development of the SUBGLER model for simulating subglacial erosion is in an early stage. SUBGLER is a two-dimensional, vertically oriented, fully numerical model, based upon highly simplified physical relationships from glaciological literature. The model simulates meltwater erosion in a drainage channel at the base of a large continental ice cap. Seasonal effects have been incorporated in the model. SUBGLER is controlled by relief, aquifer characteristics, and climate-related parameters. Simulations by the model show that climate-related parameters such as the cross-section of the ice cap, the average summer temperature, and the retreat velocity of the ice front, are probably the main parameters controlling the origin of deep subglacial depressions. The results of the SUBGLER simulations show that the influence of the subsurface lithology is subordinate to the effects of climate-related parameters.

Feasibility of developing a geological barrier model

Prerequisites for the development of a barrier model

A geological barrier model is supposed to simulate the time-dependent geological evolution of geological barriers that envelop a potential radioactive-waste repository for a specific period of time in the future. The proposed model, which may be developed later, focuses on specific geological conditions in the northeastern part of the Netherlands. Such a model could help assess and

subsequently reduce the uncertainties in the assumptions, processes and effects on the barriers.

A barrier model for the Netherlands would preferably include the following *characteristics*:
- A thorough, preferably mathematical-physical description of processes and lithological properties.
- A deterministic approach in describing and modelling processes and lithological properties, complemented by a probabilistic approach in the case of complex or uncertain aspects of processes and lithological properties.
- A time-dependent simulation of processes and lithological properties and their interactions in linked submodels, determined by the primary time-dependent processes: climate and tectonic setting.
- All relevant exogenic and endogenic processes that could affect the barriers directly or indirectly should be incorporated in the model.

Co-operation with national and international institutes is an important *prerequisite* because developing such a model requires highly specialist know-how. Moreover, it is very costly and time-consuming, therefore, the use of existing models is strongly recommended.

Evaluation of existing models

The suitability of four existing geological barrier models and two basin models for use as a basic model for the Dutch geological barrier model was evaluated. The characteristics listed above served as a frame of reference. The barrier models evaluated, which were developed specifically for disposal of radioactive waste are: GSM, FFSM, CASTOR and TIME4. The probabilistic models GSM and FFSM have been developed in the US by INTERA. CASTOR was developed in France by BRGM and has deterministic qualities. TIME4 was developed in Great Britain by Dames & Moore International; this model uses probabilistic principles extensively. The two deterministic basin models SEDPAK and SEDSIM are being developed at US universities, i.e. the University of South Carolina and Stanford University (California), respectively.

Of these four geological barrier models, GSM, FFSM, and CASTOR simulate both endogenetic and exogenetic processes. None of these models contain built-in modules for simulating lithologic properties in time. Our study proved that all models simulate time-dependency insufficiently for the purpose of this study. The physical basis of all models that were specifically developed for waste disposal was found to be unsatisfactory. CASTOR is in a relatively early stage of development. Co-operation seems to be possible with BRGM and Dames & Moore.

After evaluating all four barrier models and after testing the FFSM model specifically, none of the models proved to be suitable as a basis for developing a Dutch geological barrier model. The main reason for this conclusion was the relatively poor mathematical-physical description of processes and lithological properties. Therefore, it was decided during the evaluation to include two basin models: SEDPAK and SEDSIM. In particular, SEDSIM seems to be a good candidate to serve as a basis for a Dutch geological barrier model. SEDSIM simulates both endogenetic and exogenetic processes. It offers an excellent mathematical-physical basis for processes and lithological properties. Time-dependent forcing is absent but can probably be incorporated easily into this model. Co-operation with Stanford University, where SEDSIM was developed, is possible.

Feasibility of developing a geological barrier model

On the basis of the results of this study, a structure for a potential Dutch geological barrier model was developed, which has been called MOTTO: MOdel for fuTure Time-dependent evOlution of the subsurface. This model should comprise the following elements:
1. A local model which simulates all exogenetic and endogenetic processes that might affect the geological barriers. SEDSIM seemed to be the most suitable base model for this task.
2. A regional exogenetic model, which provides the time-dependent exogenetic input for the local model.
3. A regional endogenetic model, which provides the time-dependent endogenetic input for the local

model.

Development of a first version of such a barrier model will involve several years work. During this time a modelling concept can be designed on the basis of process studies, the concept translated into a programming code and the resulting model validated. In view of the complexity and extent of such a study a large and continuous input of specialist staff will be required during this period. Field data will be required to study a number of processes, to determine the boundary conditions of the model and to validate the model.

More detailed grouping of the salt bodies in the subsurface of the Netherlands

Introduction

Phase 1 of the OPLA Programme had two key themes: the technical feasibility and the safety of a deep underground geological repository. An aspect of the technical feasibility considered here is associated with the suitability of accommodating repository designs into Dutch salt bodies. With this potential in mind the salt bodies in the subsurface of the Netherlands have been grouped tentatively. The results of this grouping are preliminary only and intended to give direction to further studies since a final report on the suitability can only be made once the internal anatomy of one or more salt bodies has been studied during a possible follow-up study. In this section of the extended summary an indication will be given of a geological grouping of the salt bodies in the subsurface of the Netherlands on the basis of expected geological stability over the next 100,000 years. The concept 'geological stability' refers to the changes in subsurface conditions, in particular in the salt bodies, under the influence of the anticipated rise rate of the salt and the effects of an expected ice age. This grouping is based on geological grounds only and should be considered in combination with other options. The ultimate significance of this grouping for the safety of stored waste can only be ascertained once the geological processes have been analysed in a safety study. A sensitivity analysis in the current safety study PROSA has shown that the internal rise rate is one of the most sensitive parameters in connection with the safety hazards involved in disposal.

Inventory of the salt bodies

After Phase 1 of the OPLA Programme was completed in 1988, new information became available from the regular geological mapping of the subsurface of the Netherlands. In general this new information is characterised by a greater accuracy than the information available in Phase 1.
In Phase 1 of the OPLA Programme a total of 38 salt bodies were identified. In the present Phase 1A the total number of salt bodies is 45 (one salt body in southern Drenthe consists of at least three, deep-seated salt pillows, which have not been listed separately in the current study). This increase in the number of salt bodies is predominantly due to splitting the larger salt bodies into a number of smaller units on the basis of more accurate geometric data.

The structure Ulrum, in the *northern part of the Netherlands* was removed from the list of Phase 1. A recent non-OPLA inventory of the salt bodies in the Netherlands confirmed the presence of the vast majority of the salt bodies that were identified in Phase 1 for the northern part of the Netherlands, with the exception of the Ulrum structure.
The more detailed information revealed six new salt bodies in the northern part of the Netherlands, the tops of which are situated at depths greater than 1 km: one structure in the southeastern part of Friesland and five in the vicinity of the region with bedded salt in Groningen which was distinguished in Phase 1. The total number of salt bodies in the northern part of the Netherlands is now 33.

The information for the eastern part of the Netherlands (Twente and the Achterhoek) has remained very scant. The Weerselo salt structure, which was identified in Phase 1, was found to consist of two culminations, now called the Weerselo and Deurningen salt bodies. The Zechstein salt in Twente

probably is not horizontally bedded: this occurrence probably consists of three pillows. One of the salt pillows is named Tubbergen, the other two pillows Twente I and II. The total number of salt bodies in the eastern part of the Netherlands is 12.

The Ermelo salt body in the *central part of the Netherlands* was removed from the list of salt bodies. This occurrence is part of a series of small salt bodies in a broad SE-NW-trending zone in the central part of the Netherlands.

The reliability of the depth data of the tops of the salt bodies was analysed as accurately as possible. This has improved the reliability of grouping exercises which are based on the depth parameter. The results of these groupings are discussed below.

Grouping on the basis of the suitability to accommodate repository designs

The grouping of the salt bodies on the basis of mining-engineering considerations was largely based on the approach followed in Phase 1. In contrast to Phase 1, no flexibility was used concerning the dimensions of the repository designs. The dimensions of the disposal facilities, which were derived from the mining engineering study by Van Hattum and Blankevoort in 1986, were applied directly in the present grouping. The grouping exercise is based on the disposal strategy with the largest volume of radioactive waste.

A repository based on these considerations probably fits into seven of currently recognised salt bodies, 23 occurrences are probably too small or too deep unless the 1986 design is adapted, and for 13 occurrences it could not be determined as to whether they had suitable dimensions to accommodate a repository.
The design option of dry caverns in combination with deep boreholes probably fits in two out of the 43 salt bodies, in 33 salt bodies this 1986 design can probably not be constructed and for the remaining 8 occurrences no reliable conclusion on the suitability of accommodating a repository can be reached. The construction of wet caverns in combination with deep boreholes is probably possible in 19 out of the 43 salt bodies, in nine of the salt bodies, construction on the basis of the 1986 premises is probably not possible and for 15 salt bodies the amount of relevant data is insufficient to evaluate the suitability of accommodating the repository designs.

This grouping differs in some respect from the one in Phase 1 because new spatial information was used, the reliability of the depth data was incorporated and no flexibility was assumed regarding the dimensions of the repository designs.

In addition to the strategy followed in Phase 1, an alternative method has been applied to some degree in this study, which would enable a more efficient assessment of the geological data for the suitability on mining-engineering grounds. This method involves determination of the geometrical configurations and dimensions of the volumes available for disposal facilities by analysing the depth and thickness data for the Zechstein using a intricate computer program. More mining-engineering information is, however, required to enable a more detailed evaluation of the suitability of the Dutch salt bodies for accommodating the repository designs on the basis of the geometrical configurations and the sizes of the volume available for disposal.

Grouping on the basis of the expected future geological stability of the salt bodies

In a previous project at the end of Phase 1, a norm for the depths of the tops of the salt bodies in the Netherlands was developed regarding the geological stability expected for the next 100,000 years. This norm implies that in the next 100,000 years the salt bodies, the tops of which are currently located at less than 540 m below the surface, may be affected by subglacial erosion in combination with the ascent of the salt bodies and fluvial erosion. This does not imply, however, that the safety of the

repository would be affected. Various (interdependent) parameters are involved, the consequences of which will first have to be determined in the safety study. The results of this phase of the study have slightly modified the assumptions concerning fluvial erosion and salt rise on which the depth norm is (partly) based. The norm applied here hardly differs from the previous one and has been determined at 550 metres, rounding down at the nearest fifty metres.

Of the salt bodies currently identified, 23 are probably located too deep to be influenced by subglacial erosion in the next 100,000 years, whereas nine salt bodies would probably be incised by subglacial erosion in the next 100,000 years. For seven salt bodies the reliability of the basic data is insufficient to warrant conclusions. Evaluation was not possible at all for 6 salt bodies because part of the relevant data was lacking.
Deviations from a similar grouping in project 'Vervolg GEO-1' are due to the application of new map information and incorporation of the reliability of the depth data.

Implications for the safety study

The results of project GEO-1A have been used extensively in defining the FEPs (features, events and processes), which are part of the scenario analysis in the safety study PROSA. Project GEO-1A has contributed directly to defining the input parameters for the subrosion scenarios, in particular the parameter 'internal rise rate'.
The literature study on the hydrogeological characteristics of faults has demonstrated that the fault permeabilities mentioned in the literature are within the range of the permeability that has been adopted for the safety study.
In principle, the reliability analysis of spatial data and the review of characteristics of salt bodies in the Netherlands provide clues for verifying the safety-dependant characteristics of PROSA.

The Geological Survey of the Netherlands has indirectly contributed to PROSA by participating in the joint project SESAM through project GEO-1A. SESAM, a support study of PROSA, was carried out in co-operation with the National Institute of Public Health and Environmental Protection and TNO Institute of Applied Geoscience.

Project GEO-1A has also produced results for the long-term safety studies. In this context, specific reference is made to the feasibility study on the development of a geological barrier model and the simulations of the individual geological processes: salt movement, dissolution and erosion.

Conclusions and recommendations

Conclusions concerning reliability analyses

1. The accuracy of the spatial geological data available for the OPLA study was analysed systematically. Special attention has been paid to the *depth* of the top of the Zechstein and the base of the Tertiary. The standard deviation of the error involved in interpreting the depth of a horizon from borehole measurements is usually less than two metres. The standard deviation of the error involved in interpreting that depth on the basis of seismic data alone may be as large as 125 metres. In constructing contour maps from these basic data an additional map-interpretation error is introduced, which in general increases with the distance from the basic data point. Analysing the accuracy of the interpreted depths results in more reliable depth interpretations than have been possible during Phase 1. The overall quality of the maps of the top of the Zechstein that have become available for the OPLA study has improved significantly. On the maps of the top Zechstein that were available during Phase 1, the standard deviation of the error in the interpreted depth often amounted to 100 to 250 metres. On the most recent maps, however, this standard deviation is only 25 to 50 metres for some areas.
Parameters such as sizes and depths of salt bodies have been deduced from the maps and were used to compile the more detailed grouping of salt bodies for the current study.

2. *Faults* are not planar, as is frequently assumed in modelling studies, but zones with a certain width which increases with the increase in throw of the fault. The permeability of fault zones can vary substantially. This study has demonstrated that the permeability of the unfaulted rock can increase up to a factor 3 of the original one, or, alternatively, decrease by 3 orders of magnitude of the original permeability. Fault zones are almost impermeable when clay smearing occurs. In extreme cases variations in permeability can be traced laterally up to several hundreds of metres from the centre of the fault zone.
3. Application of improved, more realistic compaction corrections has resulted in average external *rise rates* that are some tens of percents to a factor 2.5 lower than the values calculated during Phase 1 of the OPLA Programme. The maximum value of the calculated external rise rate is 0.11 mm/y, for the Schoonlo salt body during the Quaternary (originally: 0.28 mm/y). Inaccuracies in the interpreted depth of geological horizons can result in errors of several hundredths of mm/y in calculated rise rates.
The maximum value of the calculated average internal rise rate is 0.12 mm/y for the salt structure Pieterburen during the Oligocene. Over geologically shorter time intervals the actual rise rate of a salt body may have deviated from this value. The assumed inaccuracy in determining the diameter of a diapir results in minimum and maximum values of the average internal rise rate that may differ by as much as a factor 2 from the minimum value.
The values of the calculated average internal and external rise rates have a comparable order of magnitude (10^{-2} to 10^{-1} mm/y).
The calculated average internal rise rate has only a limited significance for estimating the actual rise rate at a certain point in space or time in the salt body.
4. Salt bodies below the North Sea and in the northeastern part of the Netherlands are almost without exception associated with a fault in the basement below the salt. Salt bodies are better developed the larger the throw of the underlying basement faults. The ascent of salt bodies mainly takes place during (tectonic) phases of increased extensional or compressional stresses. The direct influence of these stresses on the ascent of salt bodies is apparent during compressional phases (see also the results of project GEO-4A of Amsterdam Free University). The mechanism of density reversal alone, seems to be insufficient to initiate salt movements.
Existing numerical *models of salt movement* can be applied in the OPLA study if they take the following aspects into account:
- brittle deformation of the overburden (see project GEO-4A of Amsterdam Free University);
- the presence of a basement fault underneath the salt.
5. Examination of a 6-metre-long core taken from the caprock directly above the rock salt indicates that no upward transport of salt through the caprock has occurred. Transport of fluids in the studied caprock core was either downward or sub-horizontally. This conclusion must be taken into account in dissolution simulations. The considerable contribution of the Geological Survey of the Netherlands to the *subrosion modelling study* can be found in the final report of joint project SESAM carried out in co-operation with the National Institute of Public Health and Environmental Protection and TNO Institute of Applied Geoscience.
6. The maximum depth of fluvial erosion during the past 150,000 years is estimated at 20 metres for the Netherlands. This figure is confirmed by the results of the *modelling study on fluvial erosion.* This value is significantly lower than the erosion depth of 50 metres which was assumed in Phase 1 of the OPLA Programme.
Under extreme circumstances, i.e. a very low sea level combined with tectonic uplift, the model generates a maximum fluvial-erosion depth of 100 metres over a time span of 500,000 years.
7. Statistical analysis of subglacial depressions deeper than 100 metres, shows a connection between the depth of these channels and the lithological composition of the subsurface. This implies that subglacial depressions formed in sandy areas were on average shallower than in clayey areas. For other geometrical parameters, such as the width and length of channels, no evidence of such a relationship exists.
However, the poor quality of the data used does not permit firm conclusions. This is corroborated by the first results of the *modelling study on subglacial erosion* in which the lithological composition of the subsurface seems to play a marginal role.

Conclusions concerning the more detailed grouping of the salt bodies

1. A total number of 45 salt bodies was identified in the subsurface of northern and northeastern parts of the Netherlands; whereas in the Phase 1 study only 38 were listed. This increase is largely due to the application of new, more accurate information on the subsurface of the Netherlands. Out of these 45 salt bodies, 15 are diapirs, 28 pillows and 2 areas of bedded salt.
2. If the basic assumptions of the 1986 Van Hattum and Blankevoort study are applied, a repository probably fits into 7 of the salt bodies, 23 are probably too small or too deep and no firm conclusion could be reached whether a repository would fit into 13 of the salt bodies. The repository design option of dry caverns in combination with deep boreholes can probably be accommodated into 2 salt bodies, this option can probably not be constructed in 33 salt bodies and for 8 structures the data are not sufficiently reliable to reach a conclusion. The construction of wet caverns in combination with deep boreholes is probably possible in 19 salt bodies, 9 are probably unsuitable and for 15 salt bodies no firm conclusion on this option can be presented. For two of the salt bodies in the subsurface of the Netherlands it was not possible to evaluate the suitability of accommodating the repository designs because of a lack of relevant data.
This grouping differs to some extent from the one in Phase 1 because new spatial information was used, the reliability of the data was taken into account, and the repository designs were applied without using flexible dimensions.
The results of this grouping are *preliminary* because a final conclusion on the suitability to accommodate a repository can only be reached once the internal anatomy of one or more salt bodies has been studied in a possible following phase of the Programme.
3. Out of the salt bodies currently identified, 23 are probably situated too deep to be influenced by subglacial erosion in the next 100,000 years, whereas 9 salt bodies might be eroded by future subglacial erosion in the coming 100,000 years. The reliability of the available data for 7 salt bodies was insufficient to warrant conclusions for the grouping on the basis of future stability. For 6 salt bodies no evaluation was possible because (part of) the relevant data were missing.
Deviations from a similar grouping in project 'Vervolg GEO-1' are due to the application of new map information and incorporating the reliability of the depth data in the assessment.
The grouping is based on geological norms only and does *not* address the safety implications. This would require an integrated and more comprehensive approach. The full implications of glacial processes on the safety of stored radioactive waste can only be assessed once the effects of the geological considerations presented here have been incorporated and evaluated in a future safety study.

Recommendations

1. The main result of the GEO-1A study is the delineation of the outlines of a *time-dependant geological barrier model.* Once operational, such a model should quantitatively describe potential successive future conditions of the geological barriers under the influence of geological processes such as erosion, dissolution and salt movement. It is recommended to continue development of this model and make it operational.
2. The limited amount of geological expertise gained on rocks in the subsurface of the Netherlands that might be suitable for accommodating waste-disposal facilities (e.g. rock salt) which was built up during OPLA Programme Phase 1A should not be lost when the programme is terminated. It is recommended to form and maintain *a team of Dutch experts* in this field. Such a team will maintain and preferably extend the expertise on potential lithological repositories, such as rock salt and clay in general and for the Netherlands in particular and initiate new, relevant research in this field. In such a multi-disciplinary team of experts on potential lithological repositories, theoretical, laboratory and computing specialists on e.g. hydrogeological and barrier behaviour simulations should be represented. Furthermore, aspects of retrievability should be incorporated in the research programme.
3. To predict the effects of geological processes on the subsurface of the Netherlands over the coming 100,000 years reliably and quantitatively, field studies will be required. It is recommended to carry out a thorough assessment of the set-up and potential realisation of future field studies as soon

as possible as a continuation of Phase 1. This assessment should focus on an *integrated approach* of the field studies, and emphasise close *co-operation of the various research institutes and companies* involved.

Inhoud

1 Inkadering van het geologische onderzoek *3*
1.1 Inpassing in het OPLA Programma *3*
1.2 Taakstelling van de RGD in het OPLA Programma en globale aanpak van het onderzoek *4*
1.3 Voorgaand onderzoek bij de RGD in het OPLA Programma *5*
1.4 Korte beschrijving van het onderzoeksgebied *7*
1.5 Het onderhavige onderzoek *7*
1.5.1 Doelstellingen *7*
1.5.2 Opzet van het onderzoek *7*
1.5.3 Opzet van de eindrapportage *13*

2 Resultaten van het geologische onderzoek *15*
2.1 Ruimtelijke gegevens van het afdekpakket *15*
2.1.1 Onzekerheden in ruimtelijke gegevens *15*
2.1.2 Beschikbaarheid van matig diepe gegevens nabij ondiepe zoutstructuren *23*
2.1.3 De ontwikkeling van een geautomatiseerd datasysteem *25*
2.1.4 Hydrogeologische eigenschappen van Mesozoïsche eenheden nabij zoutstructuren in de Noordzee *27*
2.1.5 Hydrogeologische eigenschappen van breuken *30*
2.1.6 Conclusies en aanbevelingen *33*
2.2 Enige aspecten van de interne opbouw van zoutstructuren *37*
2.2.1 Inleiding *37*
2.2.2 Zoutstructuren in Iran *38*
2.2.3 De zoutpijler Gorleben (Duitsland) *38*
2.2.4 De zoutstructuur Cardona (Spanje) *39*
2.2.5 Conclusies en aanbeveling *40*
2.3 Zoutbeweging *41*
2.3.1 Inleiding *41*
2.3.2 De bewegingsgeschiedenis van zoutstructuren in de Noordzee en Noordoost-Nederland *42*
2.3.3 Geologische methoden voor de kwantificering van zoutbewegingen *48*
2.3.4 Modellering van zoutbeweging *50*
2.3.5 Conclusies en aanbevelingen *51*
2.4 Caprock-vorming en het modelleren van subrosie *56*
2.4.1 Opbouw en ontstaan van caprock op basis van boorkernanalyse *56*
2.4.2 Modelmatige benadering van het proces subrosie *60*
2.4.3 Conclusies en aanbevelingen *63*
2.5 Fluviatiele en subglaciale erosie *65*
2.5.1 Algemene beschouwing van het proces fluviatiele erosie *65*
2.5.2 Modellering van fluviatiele erosie *71*
2.5.3 Nadere beschouwing van het proces subglaciale erosie *74*
2.5.4 Modelmatige benadering van subglaciale erosie *80*
2.5.5 Conclusies en aanbevelingen *82*

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2018

2.6 Haalbaarheid van de ontwikkeling van een operationeel geologisch barrièremodel *85*
2.6.1 Inleiding *85*
2.6.2 Algemene karakteristieken van een Nederlands geologisch barrièremodel *86*
2.6.3 Beschrijving en evaluatie van bestaande modellen *88*
2.6.4 Haalbaarheid van de ontwikkeling van een operationeel geologisch barrièremodel *93*
2.6.5 Conclusies en aanbevelingen *96*
2.7 Natuurlijke analogons van radionucliden-migratie *98*
2.7.1 Inleiding *98*
2.7.2 Radionucliden-migratie *98*
2.7.3 Migratie van uranium uit fosforietknollen: een Nederlands analogon *98*
2.8 Aspecten van recent onderzoek aan de pijler Gorleben *99*

3 Groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens *103*
3.1 Inleiding *103*
3.2 Samenvatting van de resultaten uit eerder onderzoek *103*
3.3 Overzicht van de Nederlandse zoutvoorkomens *104*
3.3.1 Nieuwe gegevens en onzekerheidsanalyse *104*
3.3.2 Bijgewerkt overzicht *105*
3.4 Nadere groepering op basis van de inpasbaarheid van het opbergontwerp *107*
3.4.1 Mijnbouwkundige en geologische randvoorwaarden voor de inpasbaarheid van opbergontwerpen *107*
3.4.2 Inpassing in de Nederlandse zoutvoorkomens *109*
3.4.3 Alternatieve methode op basis van beschikbare opbergvolume in zoutstructuren *112*
3.5 Nadere groepering op basis van geologische stabiliteit *114*
3.6 Conclusies *115*

Bijlage A: Tussenrapporten uitgebracht in het project GEO-1A *A.1*

De referenties zijn na elk hoofdstuk dan wel na elke hoofdparagraaf vermeld.

1 Inkadering van het geologische onderzoek

1.1 Inpassing in het OPLA Programma

Het hier gerapporteerde onderzoek maakt deel uit van de eerste fase van het programma van onderzoek inzake geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Een voorstel hiervoor werd in 1984 door de Studiecommissie Opberging te Land (OPLA Cie) op verzoek van de Beleidscommissie Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval (ILONA Cie) in rapportvorm vastgelegd. De OPLA Commissie draagt zorg voor de opzet van het programma van onderzoek en vervolgens de aansturing en beoordeling van het onderzoek dat in OPLA verband wordt uitgevoerd. Over het uitgevoerde onderzoek brengt de OPLA Commissie advies uit aan de ILONA Commissie, die op haar beurt de Ministers van Economische Zaken en Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer beleidsmatig adviseert.
De hoofddoelstelling van geologische opberging van radioactief afval in de diepe ondergrond is dit afval te isoleren van de mens en zijn leefomgeving voor zolang dit afval bij verspreiding in de biosfeer nog onaanvaardbare risico's oplevert. Hierbij wordt met name gebruik gemaakt van de natuurlijke isolatiecapaciteit van gesteenten in de ondergrond. Het voorgestelde programma van onderzoek sluit aan op de opdracht van de ILONA Commissie om "met name aan te geven wat nader onderzocht dient te worden op grond waarvan eventueel tot besluitvorming inzake de realisatie van geologische opberging in Nederland kan worden gekomen" (OPLA Cie, 1984).
Centraal in het onderzoeksprogramma staat de veiligheidsstudie (VEG-projecten) die de invulling is van de hiervoor genoemde hoofddoelstelling. De veiligheidsstudie wordt ondersteund door een groot aantal meer gedetailleerde studies in verschillende richtingen, te weten geologie (GEO-projecten), hydrologie (HYDRO-projecten), reologie en stralingsschade (REO-projecten) en mijnbouwkunde (MIJBO-projecten). De hier gepresenteerde resultaten hebben uitsluitend betrekking op het geologische onderzoek dat door de RGD in het OPLA Programma is uitgevoerd.
Het programma van onderzoek omvat drie fasen, die elk voorafgegaan worden door besluitvorming in het parlement. Voor de start van Fase 1 in het OPLA Programma is een keuze gemaakt van het type opberggesteente waarin in Nederland mogelijk radioactief afval kan worden opgeborgen (Fase 0). De keuze is in eerste instantie gevallen op steenzout van Zechstein ouderdom dat in grote hoeveelheden in de diepe ondergrond van Nederland aanwezig is.
De eerste fase, waarvan het onderhavige onderzoek deel uitmaakt, bestaat uit een inventarisatie van openbaar beschikbare gegevens die voor het onderzoek naar geologische opberging relevant zijn en een evaluatie van de diverse opbergconcepten. Uiteindelijk moet Fase 1 leiden tot de keuze van één opbergconcept en een keuze van lokaties die voor eventueel nader veldonderzoek in aanmerking kunnen komen.
Fase 2 sluit aan op Fase 1 en bestaat ondermeer uit een beperkt veldonderzoek op een aantal lokaties die met behulp van de informatie uit Fase 1 zijn geselecteerd. Het veldonderzoek is in Fase 2 gericht op de gesteentepakketten die het gastgesteente steenzout afdekken.
Fase 3 omvat een meer gedetailleerd veldonderzoek op 1 of meer lokaties waaraan zowel het afdekpakket als het gastgesteente steenzout onderworpen wordt. Aan het eind van deze fase wordt besloten of het gastgesteente verder intern onderzocht moet worden.
De eerste fase van het OPLA Programma kende tot nu toe drie subfasen, waarin ook de RGD participeerde. De RGD startte de eerste subfase, het project GEO-1, in mei 1985 en rapporteerde in maart 1988. Een vervolg op het project GEO-1 in de eerste subfase, het project Vervolg GEO-1, begon in december 1987 en werd door de RGD gerapporteerd in juli 1990. De derde subfase van Fase 1 (het project GEO-1A), waarvan hier verslag wordt uitgebracht, werd door de RGD aangevangen in september 1990. Naast de hier genoemde OPLA-projecten heeft de RGD in diverse andere projecten in het kader van het

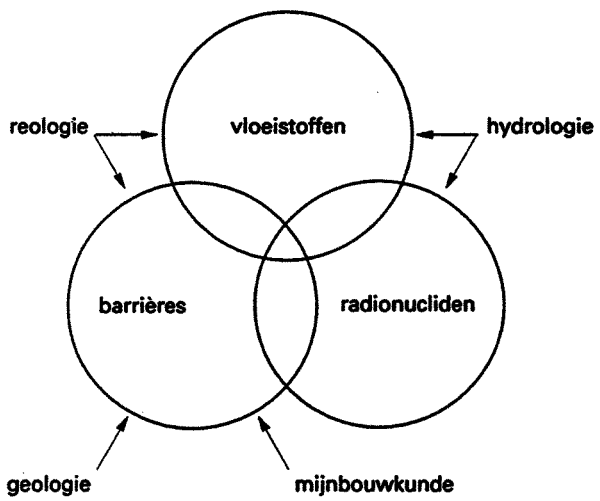
OPLA Programma deelgenomen in samenwerking met andere onderzoekinstituten. Deze projecten worden hier niet nader gespecificeerd.

1.2 Taakstelling van de RGD in het OPLA Programma en globale aanpak van het onderzoek

De centrale taakstelling in het OPLA Programma is het analyseren en vaststellen van de radiologische consequenties voor de mens van eenmaal opgeborgen radioactief afval. Deze taak wordt uitgevoerd in de veiligheidsstudie (VEG projecten). In computermodellen wordt berekend hoe het opgeborgen radioactief afval zou kunnen worden gemobiliseerd en hoe de radionucliden vervolgens zouden migreren door het steenzout en in de geosfeer, totdat blootstelling in de biosfeer plaatsvindt. Tenslotte worden stralingsdoses en de consequenties van deze doses voor de mens berekend.
In de veiligheidsstudie kan men drie belangrijke componenten of systemen onderscheiden, te weten het (multi)barrièresysteem, het vloeistofsysteem (inclusief gasvormige fasen) en het radionuclidesysteem (figuur 1). De vloeistoffen vormen het belangrijkste medium voor het transport van de radionucliden. Het barrièresysteem verhindert of vertraagt het transport van de vloeistoffen of kan het transport van radionucliden direct verhinderen door ze te adsorberen. Onder een barrière wordt in dit onderzoek verstaan een vaste massa, technisch of natuurlijk bepaald, die radionucliden kan demobiliseren of de migratie van radionucliden kan verhinderen. Deze materialen worden gekenmerkt door een hoge sorptiecapaciteit en/ of een lage porositeit en doorlatendheid.

De ondersteunende studies van de veiligheidsstudie zijn gericht op één of meer van deze systemen. De hydrologische studies houden zich met name bezig met het vloeistof- en radionuclidesysteem in de geosfeer. De radiologische studies zijn gericht op het radionuclide- en barrièresysteem. De reologische onderzoeken hebben betrekking op het vloeistof- en barrièresysteem in het gastgesteente steenzout. In de mijnbouwkundige studies gaat de aandacht uit naar de technische aspecten van het barrièresysteem. In de geologische studies worden alle aspecten van het natuurlijke barrièresysteem onderzocht, dat zowel het steenzout als de geosfeer omvat.

De belangrijkste taak in het geologische onderzoek binnen het OPLA Programma en dat van de RGD in het bijzonder, is het beschrijven c.q. voorspellen van de huidige en toekomstige toestand van de geologische barrières en het ontwikkelen van methoden en technieken om de geologische barrières te onderzoeken. De huidige toestand van de geologische barrières is direct af te leiden uit veldwaarnemingen (datastudies). Om de mogelijke toekomstige toestanden van het geologisch barrièresysteem te kunnen voorspellen, bestudeert de Rijks Geologische Dienst ten eerste de processen waarvan gebleken is dat zij in het verleden een duidelijk effect op de toestand van de geologische barrières hebben gehad. Hierbij worden alle relevante, bekende processen betrokken (zie ook RGD-30.010, 1990: hoofdstuk 2). Gewapend met deze kennis kan door middel van extrapolatie, een eerste indicatie gegeven worden van mogelijke effecten van deze processen op de geologische barrières in de



Figuur 1
De drie belangrijke systemen in de veiligheidsstudie en de bijbehorende ondersteunende studies.

toekomst. De wetenschappelijke basis voor deze wijze van voorspellen is echter niet sterk; immers, een waargenomen trend binnen een bepaald proces in het geologisch verleden hoeft a priori niet in de toekomst te worden voortgezet. Om aan de voorspellingen voor de toekomst een meer betrouwbare basis te geven is inzicht in de fysische en chemische mechanismen van de relevante processen noodzakelijk. Met behulp van, bij voorkeur op fysische en chemische leest geschoeide, modellen kunnen de mechanismen worden bestudeerd (modelstudies) en kan het effect van deze processen op hun omgeving onder uiteenlopende omstandigheden worden gesimuleerd. Bij het testen van deze, sterk theoretisch getinte modellen, spelen geologische veldgegevens een cruciale rol.
Voor elk relevant proces afzonderlijk kan een dergelijke modelstudie worden uitgevoerd. In het geologische onderzoek is tot nu toe de aandacht in het bijzonder uitgegaan naar de processen die direct ingrijpen op de omvang van de barrières, namelijk erosie, subrosie en zoutbeweging. Met behulp van een te ontwikkelen barrièremodel, waarin vereenvoudigde versies van de hiervoor genoemde modellen zijn ingebouwd, kan op meer betrouwbare wijze het gezamenlijke, tijdsafhankelijke effect van de relevante processen op de toekomstige toestand van het geologisch barrièresysteem worden bestudeerd. Deze voorspellingen zijn in eerste instantie bedoeld voor de ondersteuning van de veiligheidsstudie, maar kunnen ook gebruikt worden in andere ondersteunende studies, zoals hydrologische en reologische onderzoeken.

1.3 Voorgaand onderzoek bij de RGD in het OPLA Programma

De Rijks Geologische Dienst participeerde in tal van projecten die uitgevoerd werden in Fase 1 en Vervolg Fase 1 van het OPLA Programma. Tijdens OPLA-Fase 1 (1985-1989) werd het project GEO-1, getiteld "Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland", onder verantwoordelijkheid van de RGD uitgevoerd. Dit project hing nauw samen met een aantal andere projecten die in Fase 1 van het OPLA Programma uitgevoerd werden, te weten de projecten VEG 3-4, HYDRO-3 en REO-4. VEG 3-4 had betrekking op de veiligheidsevaluatie van mogelijke opbergconcepten in steenzout (VEOS) en werd uitgevoerd door het ECN en het RIVM. De inbreng van de RGD bestond daarbij voornamelijk in het opstellen van ruimtelijke modellen van de verschillende formatietypen (zoutpijler, zoutkussen en gelaagd zout) en het kwantificeren van oplos- en stijgsnelheden van zoutstructuren ten behoeve van specifieke, natuurlijke vrijzettingsscenario's. Het project HYDRO-3 waarvan de uitvoering onder verantwoordelijkheid van het RIVM viel, was getiteld: "Inventarisatie en evaluatie van geohydrologische gegevens van Noordoost- en Oost-Nederland ten behoeve van het onderzoek naar de opberging van radioactief afval in zoutformaties". De bijdrage van de RGD hierin bestond onder meer uit het toeleveren van hydrogeologische profielen over de zoutvoorkomens in Noord-Nederland. In het project REO-4 werd door de RGD direct geparticipeerd te zamen met het ECN en het RIVM. De titel van dit project was "De invloed van inhomogeniteiten op de isolatiecapaciteit van een zoutformatie".
Separaat van het project GEO-1 voerde de RGD - samen met DGV-TNO (nu IGG-TNO) - het project GEO-2 uit, dat was gericht op de inventarisatie en analyse van geofysische methoden voor onderzoek van zoutvoorkomens.
In een vervolg op Fase 1 van het OPLA Programma (1987-1990) voerde de RGD het project Vervolg GEO-1 uit dat een voortzetting was van het project GEO-1 in Fase 1. De titel van dit project was: "Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar".
De resultaten uit eerdere de projecten waarvan de gehele uitvoering onder verantwoordelijkheid van de RGD viel, zullen hier kort worden omschreven. Voor de resultaten van de overige projecten wordt verwezen naar de daarbij behorende rapportages (zie OPLA Commissie, 1989).

GEO-1

De doelstelling van het project GEO-1 was om, op basis van openbare gegevens, een beter inzicht te verkrijgen in de geologische opbouw en ontwikkeling in de tijd van de ondergrond in Noord- en Oost-Nederland waar Zechstein zout met een dikte van minimaal 200 meter aanwezig is. Het accent in dit project lag op de inventarisatie van ruimtelijke geologische gegevens van het onderzoeksgebied in Noord-Nederland.
Op basis van deze inventarisatie werden 38 zoutvoorkomens onderscheiden, bestaande uit 4

gebieden met gelaagd zout en 34 zoutstructuren (zoutaccumulaties ten gevolge van zoutvloei). Op basis van de toen beschikbare gegevens betreffende diepteligging en omvang bleek in 26 van de 38 zoutvoorkomens een opbergontwerp inpasbaar te zijn.
De opbouw van het afdekpakket boven de afzonderlijke zoutvoorkomens was met behulp van geologische profielen beschreven. Voor elk voorkomen waren relevante karakteristieken, zoals diepteligging, dikte en omvang van het steenzout, bepaald. Een gedetailleerde, lokatiespecifieke beschrijving van de individuele zoutvoorkomens was veelal niet mogelijk en dan met name betreffende de diepe ondergrond. De inwendige opbouw van de Nederlandse zoutstructuren was toen nagenoeg niet bekend. Hier moest volstaan worden met de inbreng van kennis betreffende de regionale opbouw van het Zechstein en met de beschrijving van enkele goed gedocumenteerde zoutstructuren in Duitsland.
Naast de beschrijving van de opbouw van de ondergrond was aandacht besteed aan de geologische processen die de stabiliteit van de zoutvoorkomens in de toekomst kunnen beïnvloeden, zoals zoutbeweging, subrosie, erosie en breukbeweging. Het ontstaan en de verdere ontwikkeling van de Nederlandse zoutvoorkomens was in globale termen beschreven. Voor enkele gevallen waren stijg- en subrosiesnelheden berekend, gemiddeld over perioden van enige honderdduizenden jaren tot enkele tientallen miljoenen jaren. De hoogst berekende waarden voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid en de gemiddelde subrosiesnelheid waren respectievelijk 0,25 en 0,15 mm/jaar.
Uit dit onderzoek bleek dat de geologische stabiliteit van de Nederlandse zoutvoorkomens op de middellange termijn (circa 100.000 jaar) met name door processen die samenhangen met het optreden van een ijstijd, kan worden beïnvloed. Het project Vervolg GEO-1 ging specifiek in op dit onderwerp van onderzoek. Een compleet overzicht van de resultaten uit het project GEO-1 kan men vinden in het RGD-rapport 10.568 (1988).

Vervolg GEO-1

De doelstelling van het project Vervolg GEO-1 was een nadere ordening in de geïnventariseerde zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland ten behoeve van lokatiespecifiek terreinonderzoek gedurende een mogelijke volgende fase van het OPLA Programma. Deze ordening werd aangebracht op basis van de te verwachten geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar. Voorts werd gewerkt aan een verfijning van de geologische methode voor de berekening van stijgsnelheden. Het accent in dit project lag op de bestudering van processen. Het onderzoek was, evenals in het project GEO-1, gebaseerd op openbare gegevens.
De meest ingrijpende, bekende verandering op een termijn van 100.000 jaar is het optreden van een ijstijd. Tijdens een dergelijke periode koelt de ondergrond af en kan sprake zijn van een permanent bevroren ondergrond (permafrost), de zeespiegel daalt en landijs kan een deel van het onderzoeksgebied bedekken. Onder het landijs kunnen diepe depressies ontstaan. Deze processen grijpen direct of indirect in op de geologische stabiliteit van zoutvoorkomens.
Uit het onderzoek kwam naar voren dat, afgezien van antropogene effecten, een belangrijke landijsuitbreiding in de komende 100.000 jaar waarschijnlijk is met een grootste kans in de periode tussen 50.000 en 100.000 jaar na heden. De permafrost, die een dikte tot 100 à 200 meter bereiken kan, zal vermoedelijk niet reiken tot in de Nederlandse zoutstructuren. Een landijsbedekking kan in een extreem geval leiden tot een extra stijging van een zoutpijler met enkele meters. Subglaciale depressies uit een vroegere ijstijd (het Elsterien) bereikten een maximale diepte van 450 meter in de regio van Noordwest-Europa. Het is niet uit te sluiten dat dergelijke depressie in de toekomst wederom ontstaan. Nederlandse zoutvoorkomens waarvan de huidige top op minder dan 540 meter onder het maaiveld ligt, kunnen door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar worden beïnvloed. Deze uitkomst leidde tot een groepering binnen het bestand van de eerder in het project GEO-1 geselecteerde 26 zoutvoorkomens: 7 ondiepe zoutvoorkomens worden mogelijk door toekomstige subglaciale erosie beïnvloed en 14 diepe voorkomens waarschijnlijk niet. Voor de intermediaire groep met de overige 5 voorkomens bestond in vergelijking met de vorige groepen meer onzekerheid betreffende de toekomstige invloed van subglaciale erosie.
Met behulp van de verfijnde berekeningsmethode bleek dat de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid voor vrijwel alle structuren de waarde van 0,1 mm/jaar niet overschrijdt. Eénmaal leverde een berekening van de gemiddelde uitwendige

stijgsnelheid een waarde op die groter was, namelijk 0,28 mm/jaar.
Voor een meer gedetailleerd overzicht van de resultaten uit het project Vervolg GEO-1 wordt verwezen naar het RGD-rapport 30.010 (1990).

1.4 Korte beschrijving van het onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied bestrijkt een groot deel van Noord-Nederland, namelijk het noordelijke deel van de provincie Friesland, de provincies Groningen en Drenthe en de regio's Twente en de Achterhoek. In de ondergrond van dit gebied zijn omvangrijke voorkomens van steenzout aanwezig met een dikte die groter is dan 200 meter. De dikte van deze voorkomens kan t.p.v. zoutstructuren, tot ruim 3000 m oplopen.
Dit steenzout is zo'n 230-250 miljoen jaar geleden (het Zechstein) in lagen tot circa 600 meter dikte afgezet door indamping van een geheel of gedeeltelijk afgesloten zeebekken. Het steenzout sloeg neer als onderdeel van zogenaamde indampingscycli, waarvan ook carbonaten, sulfaten en kalium-magnesiumzouten deel uitmaakten.
Dit gelaagde zout is in de geologische periode die volgde op het Zechstein, op diverse plaatsen in de ondergrond gaan vloeien, nadat het intussen door meer dan 500 meter nieuwe sedimenten bedekt was geraakt. Dit resulteerde op diverse plaatsen in de ondergrond in zoutkussens. Op sommige plaatsen brak het zout door de afdekkende lagen heen, in welk geval sprake is van zoutpijlers. De meest ondiepe zoutpijlers reiken met hun top tot circa 100 meter onder het maaiveld. Het gelaagde zout ligt meestal op een diepte van enkele kilometers onder het aardoppervlak. In figuur 2 is de ligging van de verschillende zoutvoorkomens in de ondergrond van Noord-Nederland aangegeven. Deze lokatiekaart is in dit project bijgewerkt met gegevens die na Fase 1 beschikbaar zijn gekomen (zie ook paragraaf 3.3).

1.5 Het onderhavige onderzoek

1.5.1 Doelstellingen

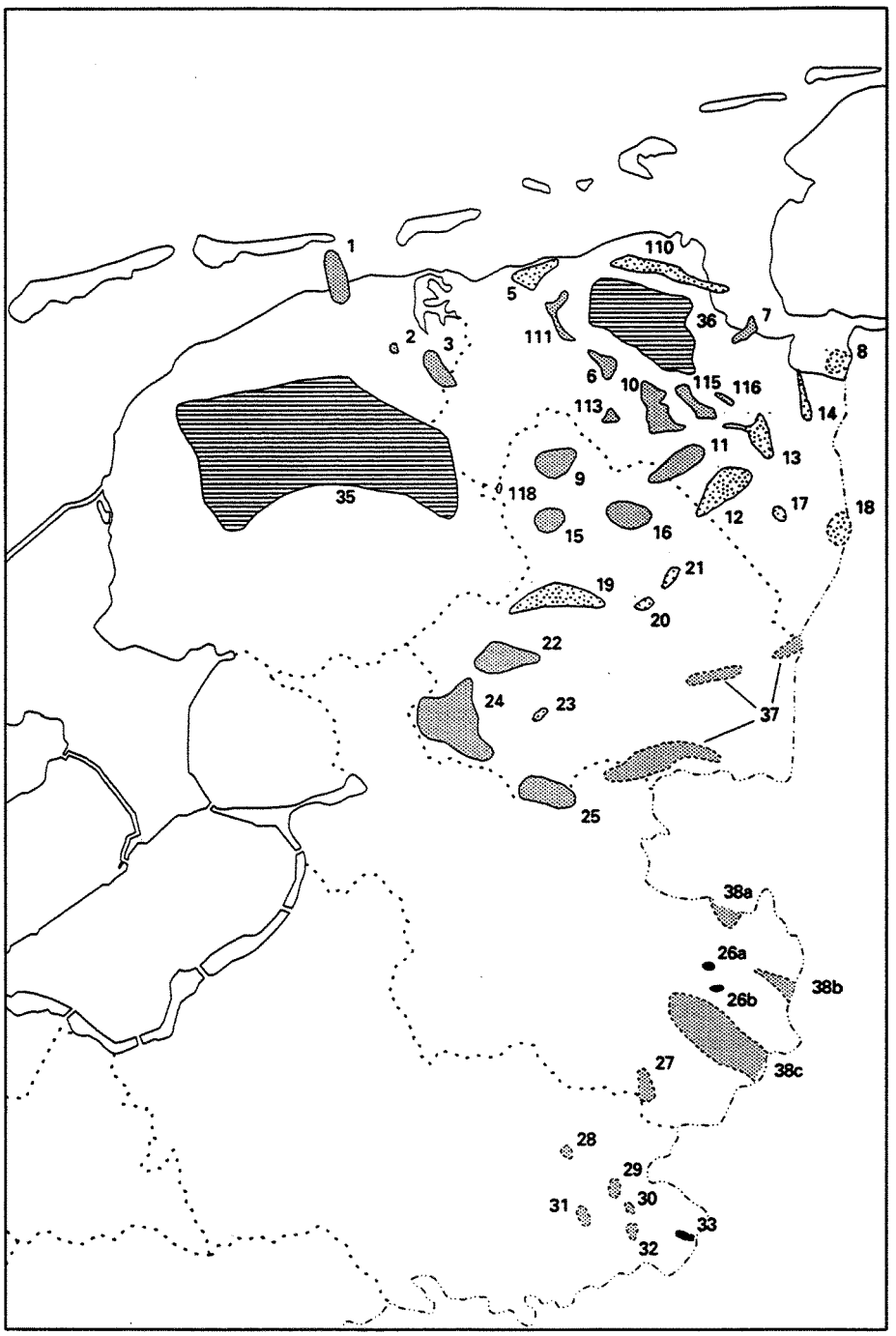
Mede op basis van de aanbevelingen in het eindrapport van Fase 1 van het OPLA Programma (OPLA Cie, 1989) en de aanbevelingen van de internationale review commissie betreffende dit rapport (1989) heeft de OPLA Commissie een tweetal hoofddoelstellingen voor het aanvullende onderzoek in Fase 1A geformuleerd met de volgende strekking:
1. Het reduceren van de variatiebreedten die in de uitkomsten van het onderzoek in Fase 1 aanwezig zijn. De variatiebreedten hebben betrekking op de gebruikte invoergegevens, de effecten van processen en de uitkomsten van modelberekeningen. Door het terugbrengen van de variatiebreedten zullen de uitkomsten van de veiligheidsstudie aan betrouwbaarheid winnen.
2. Het aanbrengen van een nadere groepering in de Nederlandse zoutvoorkomens ten behoeve van eventueel uit te voeren onderzoek in een volgende fase van het OPLA Programma.

Voorts wordt het door de OPLA Commissie van belang geacht dat aansluiting met het internationale onderzoeksveld in stand gehouden wordt dan wel tot stand gebracht wordt. Zo kan op vruchtbare wijze kennis genomen worden van buitenlandse onderzoeksresultaten die in het kader van het OPLA Programma van belang zijn.

Uit de twee hoofddoelstellingen van het aanvullende onderzoek in Fase 1A van het OPLA Programma zijn de volgende twee - geologische - doelstellingen voor het onderhavige project GEO-1A afgeleid:
1. Het vaststellen en, zo mogelijk, terugbrengen van de onzekerheden in de beschrijving van de huidige en mogelijke toekomstige toestanden van de geologische barrières. De onzekerheden betreffen de (hydro)geologische gegevens, de effecten van (hydro)geologische processen en de uitkomsten van (hydro)geologische modelstudies.
2. Het nader groeperen van de Nederlandse zoutvoorkomens ten behoeve van mogelijk toekomstig veldonderzoek in een eventuele volgende fase van het OPLA Programma op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen en de verwachte toekomstige geologische stabiliteit.

1.5.2 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek waarvan hier verslag wordt gedaan (project GEO-1A), is direct geënt op de, in de vorige paragraaf, genoemde geologische doelstellingen. Gezien de formulering van de eerste doelstelling, is het geologische onderzoek in dit project breed van opzet: de belangrijkste relevante geologische onderwerpen komen aan



1	Ternaard
2	Engwierum
3	Gerkesklooster
5	Pieterburen
6	Groningen
7	Delfzijl
8	Landschaftspolder
9	Lieveren
10	Hoogezand
11	Veendam
12	Zuidwending
13	Winschoten
14	Klein-Ulsda
15	Norg
16	Anloo
17	Onstwedde
18	Bourtange
19	Hooghalen
20	Schoonlo
21	Gasselte-Drouwen
22	Dwingelo
23	Hoogeveen
24	De Wijk
25	Dedemsvaart
26a	Weerselo
26b	Deurningen
27	Haaksbergen
28	Ruurlo
29	Groenlo
30	Gelria
31	Lichtenvoorde
32	Corle
33	Plantengaarde
35	Friesland
36	Groningen
37	Zuid-Drenthe
38a	Tubbergen
38b	Twente I
38c	Twente II
110	Bierum
111	Winsum
113	Haren
115	Noordbroek
116	Nieuw-Scheemda
118	Steenbergen

0 30 km

kussen

pijler

gelaagd zout

halotektonische structuur

ligging onzeker

Figuur 2
Lokatiekaart van de Nederlandse zoutvoorkomens volgens de stand van zaken op 1 januari 1993. Het gelaagde steenzout is minimaal 400 meter dik. In paragraaf 3.3 wordt de voor deze kaart gebruikte nieuwe informatie toegelicht. Een halotektonische structuur is een zoutstructuur waarvan de geometrie (en het ontstaan) direct gekoppeld is aan een regionale tektonische structuur zoals de opschuivingen in Twente en de Achterhoek.

bod.
In aansluiting op de eerste doelstelling en de aardwetenschappelijke taakstelling geschetst in paragraaf 1.2 is een praktisch uitvoerbare onderverdeling gemaakt in typen geologische studies die binnen het project GEO-1A zijn uitgevoerd, te weten datastudies (A), processtudies (B) en modelstudies (C).
De datastudies hebben betrekking op de hydrogeologische en geologische gegevens die de huidige en de vroegere toestand van het geologisch barrièresysteem beschrijven. In de processtudies worden de processen onderzocht die in het geologische verleden de stabiliteit van het geologisch barrièresysteem beïnvloedden. Uit de veelheid van processen zijn drie processen die ook in de toekomst een belangrijke rol kunnen spelen, geselecteerd, namelijk zoutbeweging, zoutoplossing (subrosie) en erosie. In de modelstudies zijn de geselecteerde processen op een meer theoretische, modelmatige grondslag onderzocht om zodoende een beter begrip te krijgen omtrent de mogelijke toekomstige effecten van de processen op de stabiliteit van het geologisch barrièresysteem.

Datastudies

In de datastudies van het project GEO-1A is in het bijzonder aandacht besteed aan de nauwkeurigheid van de ruimtelijke gegevens die voor het OPLA onderzoek ter beschikking stonden (projectonderdeel A1). In een separaat studie-onderdeel is de beschikbaarheid van gegevens betreffende de matig diepe ondergrond in de nabijheid van ondiepe zoutpijlers onderzocht en geëvalueerd (projectonderdeel A2A). Daarnaast is onderzoek verricht aan de hydrogeologische karakteristieken van breuken (projectonderdeel A3A) en van Mesozoïsche gesteenten nabij zoutstructuren (projectonderdeel A3B). Een geautomatiseerd datasysteem is ontwikkeld om de ruimtelijke geologische gegevens, die in het kader van het OPLA onderzoek verzameld zijn, op een efficiënte manier op te slaan zodat verificatie van onderzoeksresultaten vergemakkelijkt wordt en eventueel vervolgonderzoek in het OPLA Programma op meer efficiënte en consistente wijze uit te voeren is.

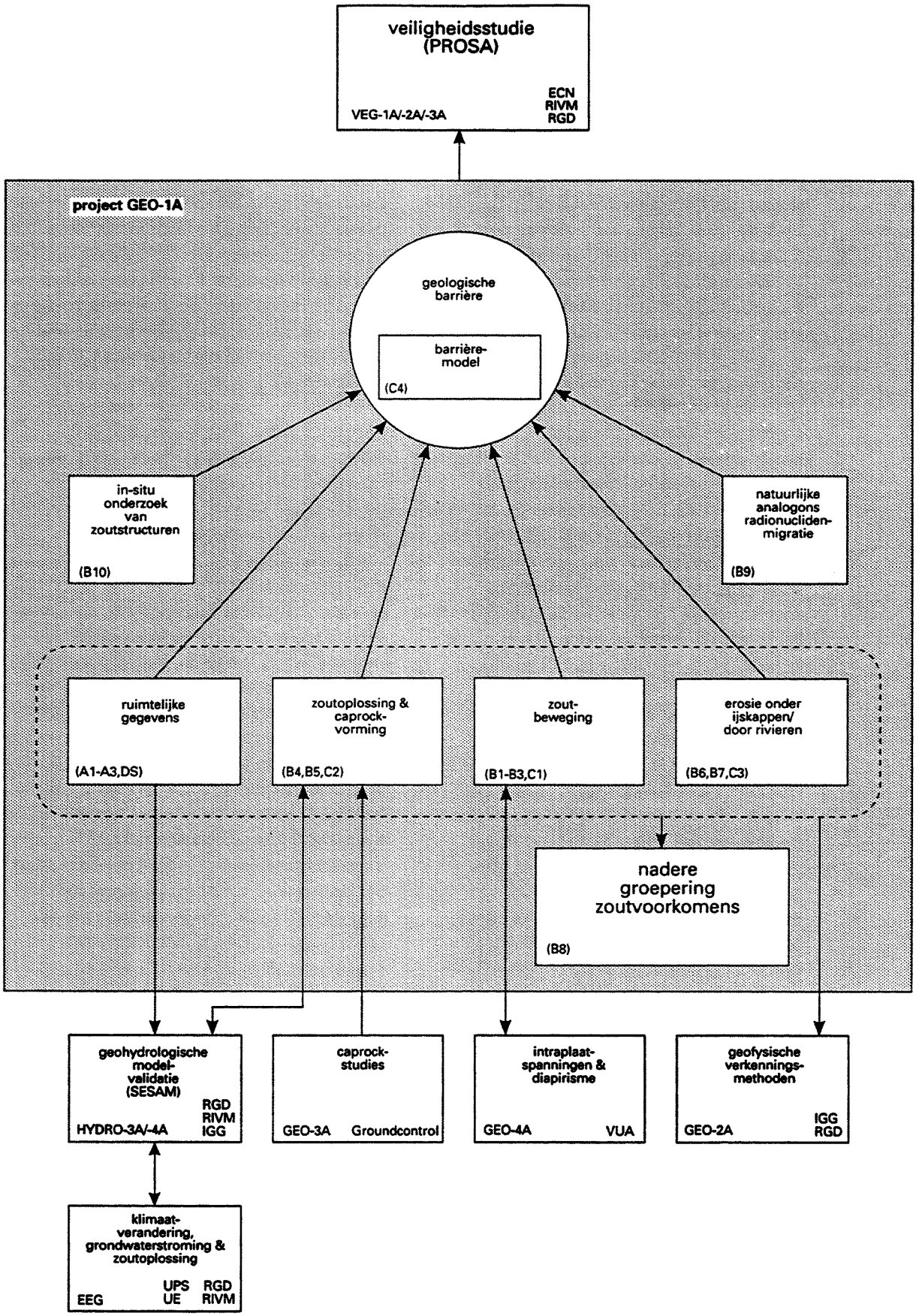
Ten behoeve van het samenwerkingsproject SESAM betreffende de lokatiespecifieke modelvalidatie van het grondwatermodel METROPOL zijn een regionaal en een lokaal ruimtelijk hydrogeologisch model opgesteld (onderdeel A2B van het project GEO-1A). In dit samenwerkingsverband hebben de RGD, het RIVM (project HYDRO-3A) en het IGG-TNO (project HYDRO-4A) geparticipeerd (zie ook figuur 3). In figuur 4 is schematisch aangegeven op welk deel van de ondergrond de afzonderlijke projectonderdelen betrekking hebben.
Gedurende het GEO-1A onderzoek zijn nieuwe geologische gegevens van het onderzoeksgebied in Noord-Nederland ter beschikking gekomen, met name vanuit de reguliere kartering van de diepe en de ondiepe ondergrond door de RGD. Het gaat hier om de kaartbladen 12 en 28 O/29 van de ondiepe ondergrond en de kaartbladen II, III en V (deels nog in concept-vorm) van de diepe ondergrond. Deze informatie is in de daarvoor in aanmerking komende onderdelen van het project GEO-1A verwerkt.

Proces- en modelstudies van zoutbeweging

Het onderzoek in het project GEO-1A dat is gericht op het proces zoutbeweging, bestaat uit de volgende onderdelen: verdere ontwikkeling en verfijning van de methodiek voor de berekening van stijgsnelheden (projectonderdeel B3), aanvullende literatuurstudie betreffende de structureel-geologische ontwikkeling van zoutstructuren (projectonderdeel B1), studie van de structureel-geologische ontwikkeling van zoutstructuren in de Noordzee en Noord-Nederland (projectonderdeel B2) en de modellering van zoutbeweging (projectonderdeel C1). Gegevens en inzichten zijn uitgewisseld met het parallel lopende modelonderzoek naar de relatie tussen zoutbeweging en intraplaatspanningen aan de VUA (project GEO-4A). Medewerkers van de Universiteit van Uppsala zijn geconsulteerd in verband met de modellering van zoutbeweging.
In aanvulling op het thema zoutbeweging is de interne opbouw van zoutstructuren onderzocht door het uitvoeren van een structurele analyse van boorkernen uit het steenzout van de pijler Gorleben en door excursies en veldonderzoek aan dagzomende zoutstructuren in Iran en Spanje (projectonderdeel B10: ten dele).

Proces- en modelstudies van zoutoplossing

De studie van het proces zoutoplossing (subrosie) in het project GEO-1A is nauw gelieerd aan het samenwerkingsproject SESAM dat te



Figuur 3
Relatieschema voor de verschillende projectonderdelen dan wel thema's in het project GEO-1A en andere projecten binnen het OPLA Programma (Fase 1A) en het EEG Programma (1990-1994) die met het project GEO-1A zijn verbonden.

zamen met het RIVM en het IGG-TNO is uitgevoerd. Eén van de RGD bijdragen is al aan de orde gekomen onder "Datastudies". Daarnaast heeft de RGD twee bijdragen geleverd betreffende de reconstructie van paleohydrologische randvoorwaarden (projectonderdeel B4) en de studie naar de fysisch-chemische aspecten van het proces subrosie (projectonderdeel C2).
Gedeeltelijk parallel aan het samenwerkingsproject SESAM participeren de RGD en het RIVM in een EEG project betreffende de simulatie van de effecten van klimatologische veranderingen op het grondwatersysteem en de veiligheid van geologische opberging van radioactief afval. Naast de twee genoemde Nederlandse instituten nemen de University of Edinburgh en de Université de Paris-Sud deel in dit project. De eindresultaten van het EEG project worden verwacht in het najaar van 1994.

Nauw verbonden met deze studie is het onderzoek betreffende de opbouw en het ontstaan van de caprock aan de hand van één 6 m lange boorkern in dit gesteente (projectonderdeel B5). Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten uit de literatuurstudie van de caprock die door Groundcontrol is uitgevoerd (project GEO-3A).

Proces- en modelstudies van erosie

Erosie is het derde proces dat in de proces- en modelstudies van het project GEO-1A is onderzocht. Hierbij is aandacht geschonken aan erosie door rivieren en aan geulvormende erosie onder ijskappen. Een algemene literatuurstudie is uitgevoerd naar de relatie tussen erosie door rivieren en veranderingen in het niveau van de zeespiegel en verticale bodembewegingen (projectonderdeel B6). Ten aanzien van geulvormende erosie onder ijskappen is onderzoek gedaan naar de relatie tussen de geometrie van de geulen en de opbouw van de ondergrond (projectonderdeel B7). Voor beide typen erosieprocessen zijn modelstudies uitgevoerd (projectonderdeel C3).

Modelstudie van het geologisch barrièresysteem

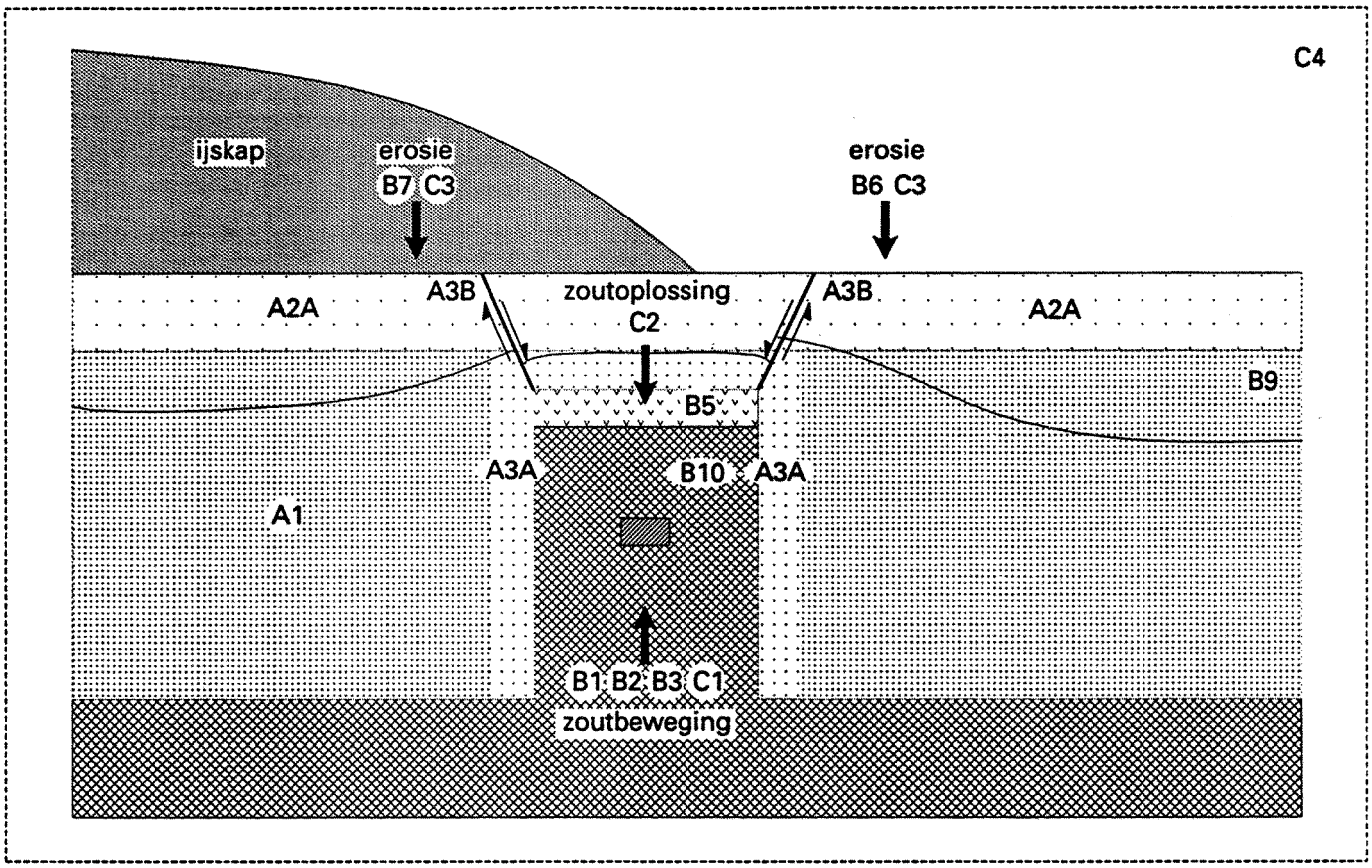
Het sluitstuk van de modelstudies in het project GEO-1A betreft het onderzoek naar de haalbaarheid van de ontwikkeling van een geologisch barrièremodel waarin de toekomstige, gezamenlijke invloed van de processen op het barrièresysteem gesimuleerd kan worden (projectonderdeel C4). Met het BRGM in Frankrijk en Stanford University in de Verenigde Staten is nauw overleg geweest met betrekking tot de haalbaarheid van de ontwikkeling van een barrièremodel.

Voor de invulling van de tweede hoofddoelstelling - de nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens - is een apart projectonderdeel opgetuigd (onderdeel B8). Hierin worden de resultaten uit de overige onderdelen van het project GEO-1A geëvalueerd om uiteindelijk te komen tot een nadere groepering op basis van mijnbouwkundige overwegingen en op basis van de te verwachten toekomstige geologische stabiliteit.

Zoals uit het voorgaande blijkt, heeft de RGD met een groot aantal onderzoeksinstituten in binnen- en buitenland samengewerkt. Frequente uitwisseling van gegevens en nauwe samenwerking is er ook geweest met de Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Duitsland, waar een Nederlands geoloog door middel van detachering het onderzoek aan de pijler Gorleben van nabij heeft kunnen volgen (projectonderdeel B10: ten dele). De RGD heeft, naast de grote inspanning betreffende de bestudering van het geologisch barrièresysteem, tevens een - beperkte - bijdrage geleverd aan de kennis van transportmechanismen van radionucliden door het uitvoeren van een onderzoek naar natuurlijke analogons van radionuclidenmigratie (projectonderdeel B9).

Vele onderdelen van het project GEO-1A hebben direct of indirect bijgedragen aan de veiligheidsstudie PROSA, met name aan de definitie van de verzameling "features, events and processes" die relevant zijn voor de veiligheidsstudie en de scenario's en aan het onderscheiden van de veiligheidsrelevante kenmerken. De resultaten uit het project GEO-1A hebben tevens een belangrijke basis gevormd voor het identificeren van parameters in het onderzoek naar geofysische verkenningsmethodieken dat te zamen met het IGG-TNO is uitgevoerd (project GEO-2A).

Het onderzoek in het project GEO-1A heeft geresulteerd in een groot aantal tussenrapporten die bestemd zijn voor intern gebruik in het kader



geosfeer
geosfeer (nabij gastgesteente)
geosfeer (ondiep)
caprock
gastgesteente
opbergfaciliteit
breuk
geologisch proces
geologisch grensvlak

A1	betrouwbaarheidsanalyse van de beschikbare geologische gegevens
A2A	aanvullende inventarisatie van basisgegevens betreffende de matig diepe ondergrond
A3A	analyse van boorgatmetingen voor de bepaling van hydrogeologische karakteristieken van Mesozoïsche gesteenten
A3B	literatuurstudie van de hydrogeologische karakteristieken van breuken
B1	inleidende literatuurstudie van zoutbeweging
B2	studie van de structurele ontwikkeling van zoutstructuren in de Noordzee en noord-Nederland
B3	verfijning van de berekeningsmethoden van groeisnelheden en hun toepassing
B5	studie van de opbouw en het ontstaan van caprock aan de hand van een boorkern
B6	literatuurstudie van erosie in samenhang met bewegingen van de zeespiegel en de bodem
B7	literatuurstudie van subglaciale erosie en statistische analyse van kaartinformatie
B9	haalbaarheidsstudie betreffende een natuurlijk analogon van radionucliden-migratie in Nederland
B10	in-situ onderzoek aan zoutstructuren
C1	modelstudie van zoutbeweging
C2	modelstudie van zoutoplossing
C3	modelstudie van fluviatiele en subglaciale erosie
C4	haalbaarheidsstudie voor de ontwikkeling van een geologische barrièremodel

Figuur 4
Schematische weergave van het gastgesteente en de geosfeer en de relevante processen die deze geologische barrières kunnen beïnvloeden. Globaal is aangegeven op welk facet de verschillende onderdelen van het project GEO-1A betrekking hebben.

van het OPLA Programma. In bijlage A is een overzicht opgenomen van deze tussenrapporten.

Randvoorwaarden

Een belangrijke, beperkende randvoorwaarde bij de uitvoering van de GEO-1A en eerdere in het OPLA-kader uitgevoerde studies, is de beschikbaarheid van gegevens van de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland. Uitgangspunt was dat de onderzoekers in dit kader alleen gebruik konden maken van bestaande, vrij toegankelijke gegevens, alsmede van de door de RGD zelf verzamelde basisgegevens en gepubliceerde rapporten.
Een andere randvoorwaarde betrof het feit dat in Noord- en Oost-Nederland géén veldonderzoek in dit kader uitgevoerd mocht worden.

1.5.3 Opzet van de eindrapportage

De tussenrapporten die gedurende de doorlooptijd van het project GEO-1A zijn geproduceerd (bijlage A), vormen de basis voor de eindrapportage van dit project. De eindverantwoordelijkheid voor dit rapport berust bij de Rijks Geologische Dienst. Het eindrapport bestaat uit zes delen, waarvan het onderhavige, eerste deel een overzicht van de resultaten omvat.
Dit deel vormt de kern van de eindrapportage in het project GEO-1A. In het eerste hoofdstuk wordt de inkadering van het project GEO-1A in het OPLA Programma aangegeven. In hoofdstuk 2 komen de resultaten uit het project GEO-1A in beknopte vorm aan de orde met een accent op de invulling van de eerste doelstelling. Het derde en laatste hoofdstuk omvat de bespreking van de tweede doelstelling betreffende de nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens. De overige vijf delen gaan meer uitgebreid in op specifieke onderzoeksthema's in het project GEO-1A en zijn in tegenstelling tot het onderhavige deelrapport, in het Engels geschreven. Op deze manier kan een betere uitwisseling van onderzoeksresultaten met buitenlandse instellingen plaatsvinden en wordt de mogelijkheid tot participatie in toekomstig internationaal onderzoek bevorderd.
Elk deel van het eindrapport is zodanig van opzet dat het ook apart van de andere delen gelezen kan worden.

De thematische delen in het eindrapport zijn:
a. Spatial data
b. Salt movement
c. Caprock formation and subrosion
d. Fluvial and subglacial erosion
e. Geological barrier model

Alle resultaten, behoudens enkele hierna genoemde onderdelen, komen in de thematische delen aan de orde. De resultaten uit het project GEO-1A die door de RGD ingebracht zijn in het samenwerkingsproject SESAM, zijn in het eindrapport van SESAM opgenomen (zie RIVM, RGD & IGG-TNO, 1993) en komen hier verder niet ter sprake. Het betreft de resultaten uit de projectonderdelen A2B en B4 en gedeeltelijk uit onderdeel C2 (voor een verklaring van de codes wordt verwezen naar de vorige paragraaf).

Een aantal onderwerpen van het GEO-1A project komen alleen ter sprake het deelrapport "Overzicht van de resultaten". Dit zijn de uitkomsten van het onderzoek naar natuurlijke analogons van radionucliden-migratie (B9), de stand van zaken in het onderzoek aan de pijler Gorleben (B10: ten dele) en de nadere groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens (B8).

Referenties

OPLA Commissie (1984). Voorstel voor een programma van onderzoek inzake geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Uitg.: Ministerie van Economische Zaken, rapportno. IL-103/OPLA 84-50.

OPLA Commissie (1989). Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Eindrapport Fase 1 van het OPLA Programma. Uitg.: Ministerie van Economische Zaken.

Rijks Geologische Dienst (1988). Aut.: M.C. Geluk & A.F.B. Wildenborg. Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland. Projectno. 10.568, project GEO-1, OPLA Fase 1.

Rijks Geologische Dienst (1990). Aut.: A.F.B. Wildenborg, E.F.J. de Mulder, J.H.A. Bosch, R. Hillen, F. Schokking & K. van Gijssel. Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar. Rapportno. 30.010, project Vervolg GEO-1, Vervolg OPLA Fase 1.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Mileuhygiëne, Rijks Geologische Dienst & Instituut voor Grondwater en Geo-energie TNO (1993). Aut.: M. Oostrom, K. van Gijssel & W. Zijl. Modelling subrosion and groundwater flow in the vicinity of the Zuidwending diapir on the basis of geometrical and (palaeo)hydrological boundary conditions for the northeastern Netherlands. RIVM no. 715205004, SESAM project, OPLA Fase 1A.

2 Resultaten van het geologische onderzoek

2.1 Ruimtelijke gegevens van het afdekpakket

2.1.1 Onzekerheden in ruimtelijke gegevens

Inleiding

De analyse van de onzekerheden in de ruimtelijke gegevens sluit direct aan op een deel van de eerste doelstelling: de analyse van de variatiebreedte in de huidige toestand van de geologische barrières. Het geologische onderzoek in het kader van het OPLA Programma maakt uitsluitend gebruik van openbaar beschikbare gegevens die voor andere doeleinden dan die in het OPLA Programma zijn verzameld. Een onzekerheidsanalyse is gewenst om een indruk te krijgen van de nauwkeurigheid van de gegevens en om ze optimaal te kunnen gebruiken in het OPLA onderzoek.

Methodiek

De betrouwbaarheid van ruimtelijke gegevens in het algemeen en dieptewaarden op contourkaarten en verticale profielen in het bijzonder, is geanalyseerd. Hiervoor is een methodiek gebruikt die de verschillende foutenbronnen vanaf het verkrijgen (acquisitie) van de gebruikte basisdata, via bewerking en interpretatie, tot aan de constructie van afgeleide ruimtelijke gegevens door middel van interpolatie van de basisdata analyseert en sommeert.

De eenheid die hier gebruikt wordt om de nauwkeurigheid van diepte gegevens te kwantificeren is de standaarddeviatie. De standaarddeviatie wordt als volgt gedefinieerd:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_N (Z_w - Z_e)^2$$

S = standaarddeviatie; Z_w = waargenomen diepte;, Z_e = verwachte diepte; N = aantal waarnemingen.

Aangenomen wordt dat het verschil tussen Z_w en Z_e normaal verdeeld is wanneer elke oorzaak van de afwijking tussen Z_w en Z_e, een symmetrisch verdeelde fout oplevert en de groep oorzaken talrijk is.

Een andere aanname is dat bedoelde foutenbronnen onderling onafhankelijk zijn. Op basis hiervan zijn de schattingen van de standaarddeviatie van afzonderlijke foutenbronnen meetkundig op te tellen.

Het is te verwachten dat de standaarddeviatie van de verschillende foutenbronnen afhankelijk is van eigenschappen van de onderhavige geologische horizon. Het is gebleken dat de diepteligging en de structurele complexiteit bepalende eigenschappen zijn. Voor de statistische analyse is uitgegaan van referentiediepteliggingen. Voor de onderzochte basis Tertiair horizon en de top Zechstein horizon was deze gesteld op 1000 m, respectievelijk 3000 m. De structurele factor is gekwantificeerd door definiëring van twee groepen van verschillende structurele complexiteit, gekenmerkt als "zwak" en "sterk". Horizons met een zwakke structurele complexiteit hellen gemiddeld minder dan 40°. Horizons met een sterke structurele complexiteit hebben gemiddelde laaghellingen van meer dan 40°.

Geanalyseerde kaartgegevens

De hierboven geschetste methodiek is toegepast op ruimtelijke gegevens in de vorm van contourkaarten en verticale profielen. Geanalyseerde kaarten en kaartdelen zijn: dieptekaart basis Tertiair Noord-Nederland (RGD-10.371, 1984), de dieptekaart top Zechstein Noord-Nederland (RGD-6.009, 1984) en kaartblad II, Noord-Friesland, van de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland (RGD, 1992). Deze laatste is als referentie in delen van het onderzoek betrokken. Tevens is één verticaal profiel aan de foutenanalyse onderworpen: de interpretatie van seismische sectie 8601 N, lopend in NNO-ZZW richting door Oost-Groningen en Oost-Drenthe.
De hiervoor genoemde kaarten en profiel werden voor andere doeleinden samengesteld dan die in het geologische onderzoek van het OPLA Programma opgeld doen.

Horizon	Helling	A	B	C	Totaal
100 m (referentie diepte zonder logs)	zwak	1	0	1	1
	sterk	2	0	1	2
1000 m (basis Tertiair boring met logs)	zwak	1	0	0	1
	sterk	2	0	0	2
3000 m (top Zechstein boring met logs)	zwak	1	1	0	1
	sterk	2	1	0	2

Tabel 1
Standaarddeviatie van de observatie fout (m) van boorgegevens van dieptebepalingen via boringen. Er is onderscheid gemaakt tussen een drietal horizons en twee situaties met een verschillende structurele complexiteit. A: plaatsbepaling, B: deviatie, C: methodiek (boorgruis/ boorkernen/boorsnelheid vs boorgatmetingen).

Voor de beschrijving van de Nederlandse zoutvoorkomens in hoofdstuk 3 is, naast de hier geanalyseerde kaarten, gebruik gemaakt van kaartgegevens die in de eindfase van het project GEO-1A beschikbaar zijn gekomen. Dit kaartmateriaal wordt in het algemeen gekenmerkt door een hoge nauwkeurigheid. Vanwege de beperkt beschikbare tijd, is het niet mogelijk gebleken de meest recent beschikbaar gekomen kaarten aan een uitgebreide betrouwbaarheidsanalyse te onderwerpen. De betrouwbaarheidsanalyse van de ruimtelijke gegevens die wel beschikbaar zijn, heeft niet meer dan een voorbeeldfunctie voor de wijze waarop fouten geïntroduceerd kunnen worden in ruimtelijke data.
De drie genoemde kaartbeelden en het geologisch profiel worden hieronder kort besproken.

Dieptekaart basis Tertiair: Dit contourbeeld was gebaseerd op kwalitatief goede, niet-gemigreerde 2D seismiek uit 1979. De gemiddelde afstand tussen de seismische lijnen was circa 5 km. Voor de constructie van de dieptekaart basis Tertiair was deze seismiek naar diepte eenheden geconverteerd met een op details onbekend snelheidsprofiel. Deze seismiek was de enige databron bij de samenstelling van deze kaart. Wel zijn boringen achteraf gebruikt als controlemiddel, waarbij voor geconstateerde afwijkingen plaatselijk gecorrigeerd is.

Dieptekaart top Zechstein: Bij de constructie van de dieptekaart top Zechstein is vooral gebruik gemaakt van niet-gemigreerde 2D seismiek uit 1971. Rond zoutstructuren is de gemiddelde afstand tussen seismische lijnen zo'n 3-5 km. Vanwege de beperkt beschikbare tijd is de tijd-diepte conversie van deze seismiek volgens vereenvoudigde procedures uitgevoerd. De samenstelling van de dieptekaart top Zechstein is hoofdzakelijk op deze seismische gegevens gebaseerd. Wel zijn boringen achteraf gebruikt als controle- en correctiemiddel.
Kaartblad II: Deze kaart is hoofdzakelijk gebaseerd op seismische data uit de periode 1978-1985. Er is gestreefd naar een maximale afstand tussen seismische lijnen van 4 km. Rond zoutstructuren werd de onderlinge afstand tot gemiddeld 2 km teruggebracht. De seismiek was van redelijke tot goede kwaliteit met uitzondering van seismische gegevens in de Waddenzee; die van mindere kwaliteit was. In het algemeen was hierbij geen gebruik gemaakt van gemigreerde seismiek. Tijd-diepte conversie was uitgevoerd met behulp van de z.g. Landelijke Snelheidsverdeling. Het contourbeeld was uitsluitend op deze seismische gegevens gebaseerd; in principe was niet gecorrigeerd op plaatsen waar data van boringen voorhanden waren.

De seismische lijn 8601N: Deze seismische lijn, in 1986 geschoten door Delft Geophysical voor onderzoek van de onderkorst van de aarde (diepte tot enkele tientallen kilometers), behoort tot de openbare en voor het doel van dit onderzoek vrij toegankelijke gegevens (Remmelts & Duin, 1990). De tijd-diepte conversie was met behulp van de Landelijke Snelheidsverdeling uitgevoerd. De dieptesectie was in het onderhavige onderzoek gebruikt voor de analyse van de onzekerheid in de dieptekaarten.

Onzekerheidsanalyse van boorgegevens

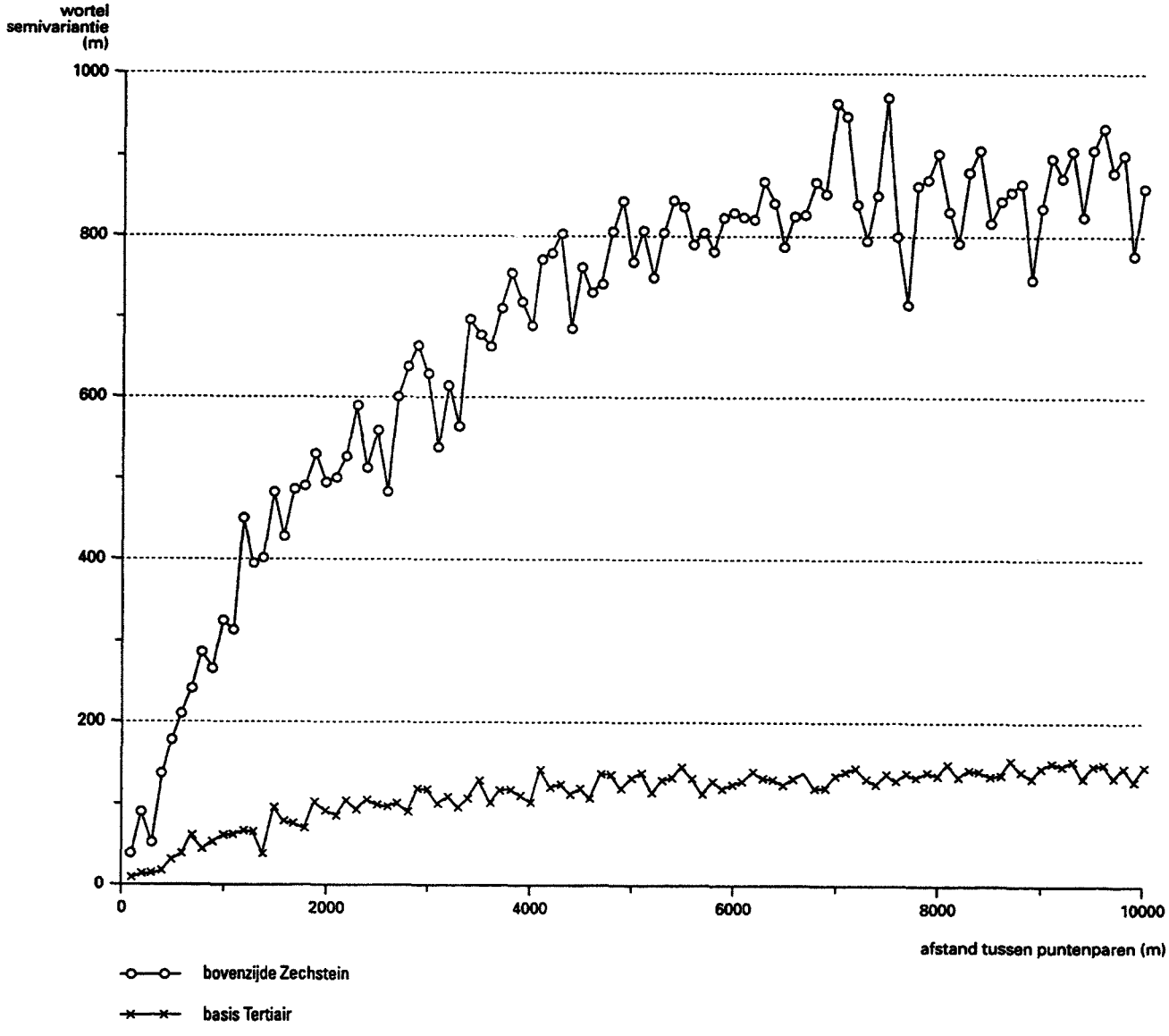
Boringen leveren inzichten in de diepteligging van een geologische laag op één punt.
Belangrijke foutenbronnen bij boringen zijn: 1. de plaatsbepaling, 2. de resterende deviatie en 3. de dieptebepaling.
1. Onnauwkeurigheden in de bepaling van de plaats waar een boring gezet is leidt indirect tot een foutieve schatting van de diepte van een aangetroffen horizon, mede afhankelijk van de gemiddelde helling van betreffende laag. Een karakteristieke fout in de plaatsbepaling is geschat op 10 m. Voor zwak hellende lagen leidt

dit tot een standaarddeviatie van deze foutenbron van 1 m, voor sterk hellende lagen is de standaarddeviatie van de foutenbron gesteld op 2 m.

2. Onnauwkeurigheden in de bepaling van de deviatie leidt ook indirect tot een foutieve schatting van de diepte van de aangetroffen horizon, maar is nu mede afhankelijk van de waarnemingsdiepte van die laag. Bij een karakteristieke fout in de bepaling van de deviatie van 1° kan de standaarddeviatie van deze foutenbron voor de basis Tertiair horizon afgerond worden naar 0 m, voor de top Zechstein horizon is deze 1 m.

3. De dieptebepaling van de basis Tertiair en top Zechstein horizons gebeurt in de regel met behulp van boorgatmetingen. Vanwege de duidelijke lithologische contrasten aan weerszijde van beide horizons is de standaarddeviatie van deze foutenbron voor beide horizons afgerond naar 0 m.

Meetkundige optelling van alle foutenbronnen levert de standaarddeviatie van de observatiefout van dieptewaarden verkregen met behulp van boringen. De standaarddeviatie van de observatiefout is in tabel 1 gegeven voor zowel zwak als sterk hellende basis Tertiair en de top Zechstein horizons.



Figuur 5
De afstandsafhankelijke standaarddeviatie van dieptewaarden van de top van het Zechstein of de basis van het Tertiair als aanwezig op de interpretatie van seismische lijn 8601N.

Onzekerheidsanalyse van seismische reflectie gegevens

De seismische reflectie methodiek levert inzichten in de diepteligging van horizons langs een lijn. Aangenomen is dat de belangrijkste potentiële foutenbronnen bij de seismische reflectie zijn: 1. processing (w.o. statische correctie), 2. ruimtelijke positionering, 3. horizonbepaling en 4. tijd-diepte conversie.

1. Processing is het totaal van handelingen, waardoor de in het veld vergaarde ruwe seismische data omgevormd worden tot een tijdsectie. Een belangrijk onderdeel van de processing zijn de statische correcties, uitgevoerd om de invloed van topografie en verweringslaag te compenseren. De processing is een potentiële foutenbron die toeneemt met de diepte. De fouten die optreden bij de processing kunnen onafhankelijk van de structurele complexiteit worden beschouwd. Schattingen van de standaarddeviatie van deze foutenbron belopen 5 m voor de basis Tertiair horizon en 15 m voor de top Zechstein horizon.

2. Ruimtelijke positionering (=migratie) is een methodiek die de reflecties waargenomen in seismische secties in een meer waarheidsgetrouwe onderlinge geometrische relatie kan brengen. De effecten van deze methodiek zijn afhankelijk van de diepteligging en de structurele complexiteit van de reflecterende horizon en de eigenschappen van alle hierboven liggende seismostratigrafische eenheden. Het niet uitvoeren van ruimtelijke positionering veroorzaakt een systematische fout in de diepteligging, resulterend in een overschatting van omvattende volumes. Schattingen van deze systematische fout zijn voor de basis Tertiair horizon in de orde van vele tientallen meters, voor de top Zechstein horizon vele honderden meters. Toepassing van ruimtelijke positionering is echter zelf ook een potentiële foutenbron, waarvan de standaarddeviatie is geschat op 20 m.

3. Door imperfecties in de weergave van seismische horizons in tijdsecties is de bepaling van deze horizons niet exact. De standaarddeviatie veroorzaakt door niet-exacte horizonbepaling is afhankelijk van de horizonschatting van de betreffende horizon en van alle bepalingen van de hierboven liggende horizons en de aldaar aangenomen snelheidscontrasten. De standaarddeviatie van deze potentiële foutenbron voor de basis Tertiair horizon is 5 m, van de top Zechstein 10 m.

4. Tijd-diepte conversie wordt toegepast om een seismische tijdsectie om te zetten naar een dieptesectie. De fout in deze methodiek is in hoge mate afhankelijk van het gebruikte snelheidsprofiel. Voor kaartblad II is gebruik gemaakt van de z.g. Landelijke Snelheidsverdeling, waarvoor een standaarddeviatie van

Kaarten/Profiel	Helling	A	B	C	D	Totaal
Seismiek van dieptekaart	zwak	5	0	5	15	17
basis Tertiair	sterk	5	30	5	15	34
Seismiek van dieptekaart	zwak	15	30	10	75	83
top Zechstein	sterk	15	100	10	75	126
Seismiek van kaartblad II	zwak	5	0	5	10	12
basis Noordzee Supergroep	sterk	5	30	5	10	32
Seismiek van kaartblad II	zwak	15	30	10	30	46
top Zechstein Groep	sterk	15	100	10	30	106
Profiel van seismische lijn	zwak	5	0	5	10	12
8601N basis Tertiair	sterk	5	20	5	10	23
Profiel van seismische lijn	zwak	15	0	10	30	35
8601N top Zechstein	sterk	15	20	10	30	40

Tabel 2
Standaarddeviatie van de observatie fout (m) van de seismische gegevens die gebruikt zijn voor genoemde kaarten en profiel, gebaseerd op schattingen van de standaarddeviatie (m) van verschillende foutenbronnen: A: Processing, B: Ruimtelijke positionering (migratie), exclusief systematische fout. C: Identificatie van geologische horizons, D: Tijd-diepte conversie.

10 m geldt voor de basis Tertiair horizon en 30 m voor de top Zechstein horizon. De dieptekaart basis Tertiair is met een onbekend snelheidsprofiel geconverteerd; de standaarddeviatie van deze foutenbron is geschat op 15 m. De tijd-diepte conversie die gebruikt is voor de dieptekaart top Zechstein is minder nauwkeurig; hiervoor is een standaarddeviatie van 75 m aangenomen.

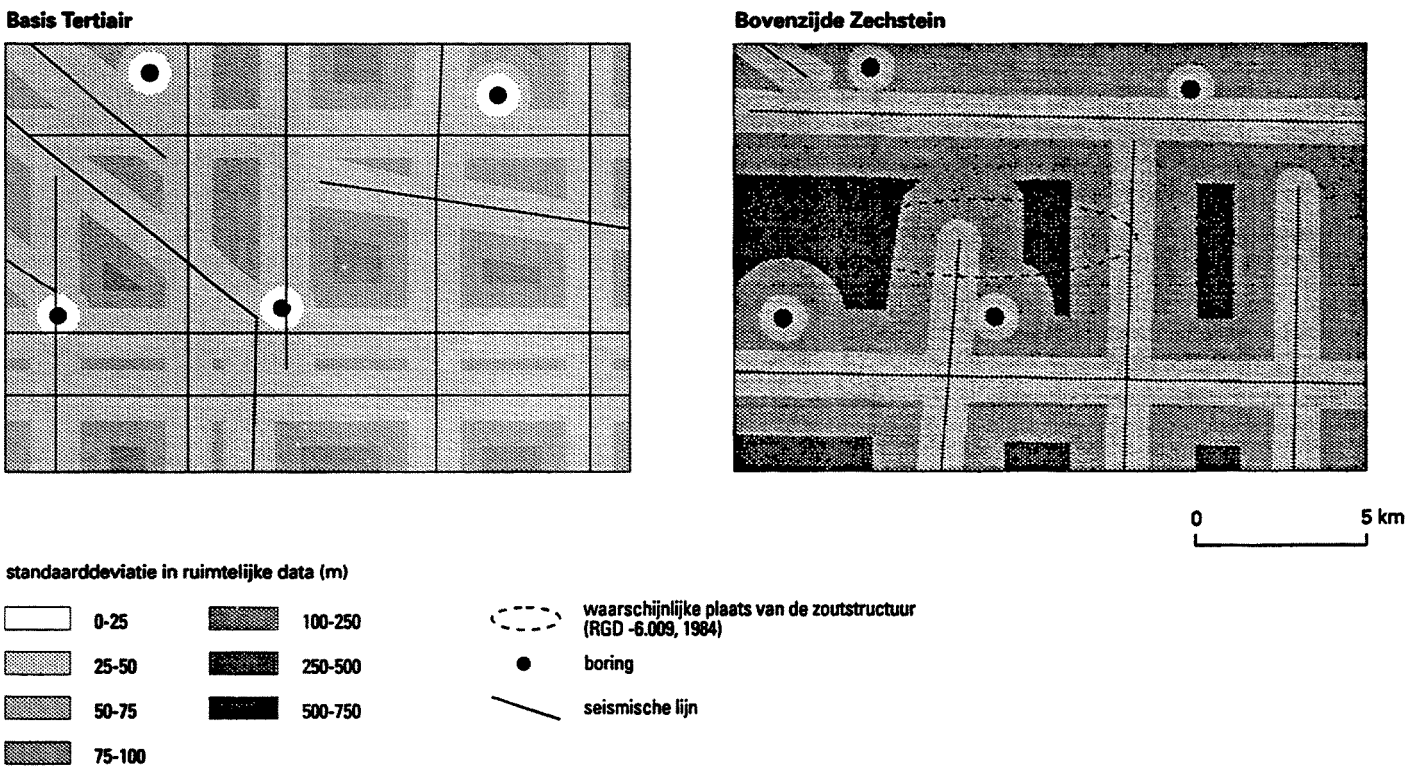
Onder de aanname van onderlinge onafhankelijkheid van deze foutenbronnen, levert meetkundige optelling van alle foutenbronnen levert de standaarddeviatie van de observatiefout van dieptewaarden verkregen met behulp van de seismische reflectie methodiek. De standaarddeviatie van de observatiefout, opgesplitst naar structurele complexiteit, is in tabel 2 gegeven ter karakterisering van seismiek, gebruikt voor de dieptekaart basis Tertiair en de dieptekaart top Zechstein.

Onzekerheidsanalyse van contourkaarten

Ruimtelijke geologische informatie, verkregen met de hiervoor aangehaalde methodieken, kunnen visueel weergegeven worden door middel van contouren. De constructie van contourbeelden is echter een additionele foutenbron, veroorzaakt door de noodzakelijke interpolatie tussen datapunten. Deze foutenbron wordt hier kaart-interpretatiefout genoemd.

De gemiddelde standaarddeviatie van de kaart-interpretatiefout is afhankelijk van de gemiddelde onderlinge afstand tussen de basisdatapunten. In absolute zin neemt de standaarddeviatie van de kaart-interpretatiefout toe met toenemende afstand van een basisdatapunt. De mate waarmee de standaarddeviatie van de kaart-interpretatiefout toeneemt is afhankelijk van de structurele complexiteit van de te beschrijven horizon.

Een kwantitatieve indruk van de structurele complexiteit is te verkrijgen met behulp van een semivariogram. Een semivariogram geeft de onderlinge gemiddelde standaarddeviatie tussen twee datapunten weer, die op verschillende posities dieptewaarden van dezelfde horizon geven. Figuur 5 toont een semivariogram van de basis Tertiair en top Zechstein horizons, geconstrueerd met behulp van seismische lijn 8601N. Ter plaatse van de seismische lijn 8601N

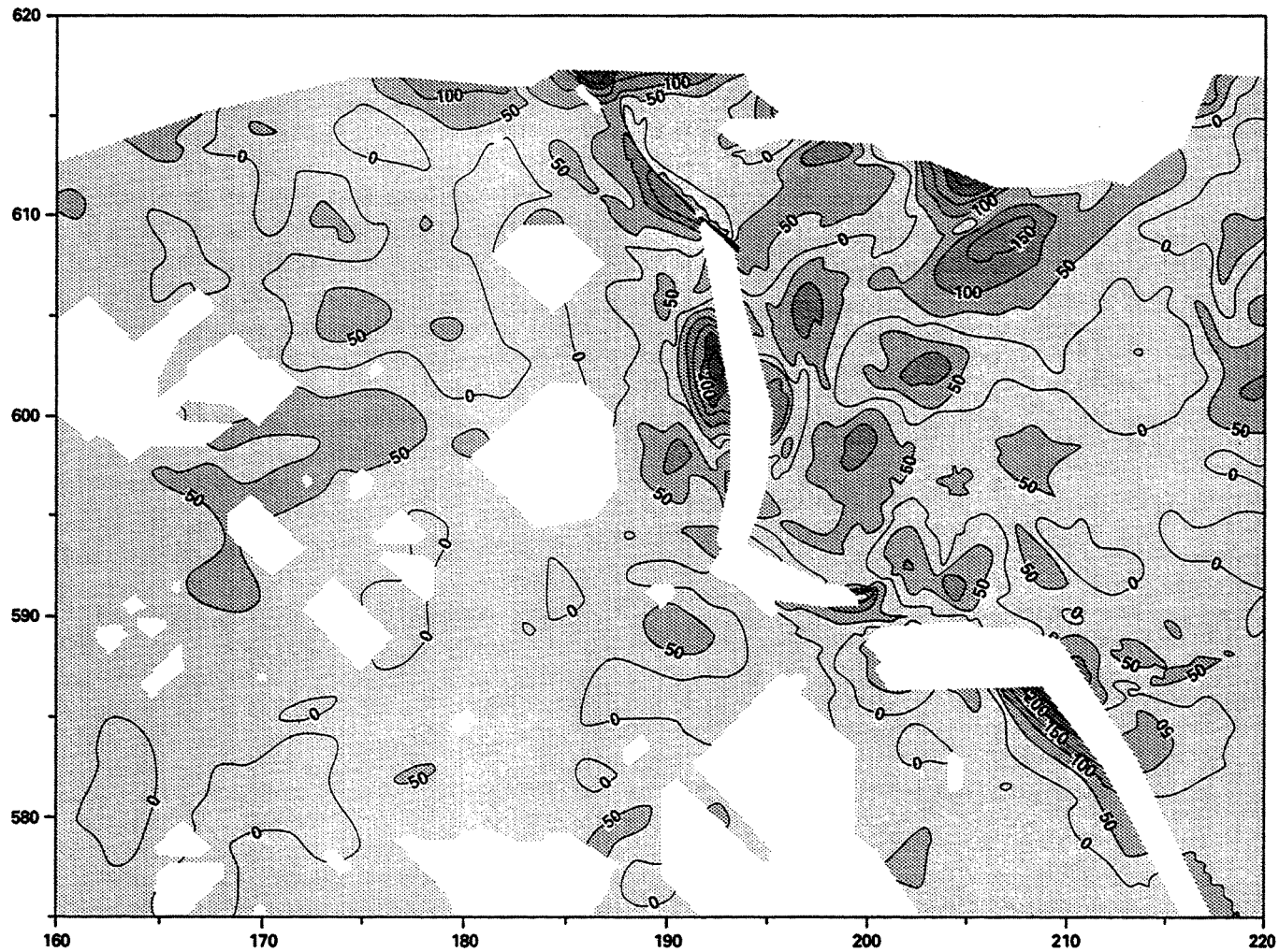


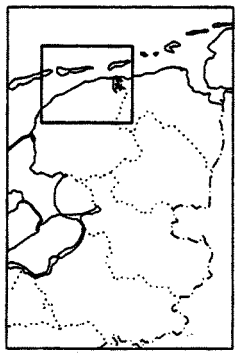
Figuur 6
Twee voorbeelden van de plaatsafhankelijke standaarddeviatie van ruimtelijke data. Links: de basis van het Tertiair; rechts: de top van het Zechstein. In het algemeen is de plaatsafhankelijke standaarddeviatie van de basis Tertiair geringer.

vertoont de top Zechstein horizon een hogere structurele complexiteit dan de basis Tertiair horizon. Bij gelijke datadichtheid zal voor eerstgenoemde horizon dus de kaartinterpretatiefout langs deze seismische lijn hoger zijn.

Bij de toepassing van het in deze studie bepaalde semivariogram zijn de volgende twee aannames gedaan:

1. De geïnterpreteerde seismische lijn geeft een geometrisch correct beeld van de ondergrond. Dit betekent dat het semivariogram gebaseerd op de seismische lijn, ook toegepast kan worden boorgegevens.
2. De kaart-interpretatiefout is gelijk aan de wortel uit de semivariantie. Met behulp van de gegeven schattingen van de standaarddeviatie van de observatiefout van boringen, de seismische reflectie methodiek, de standaarddeviatie van de kaart-interpretatiefout



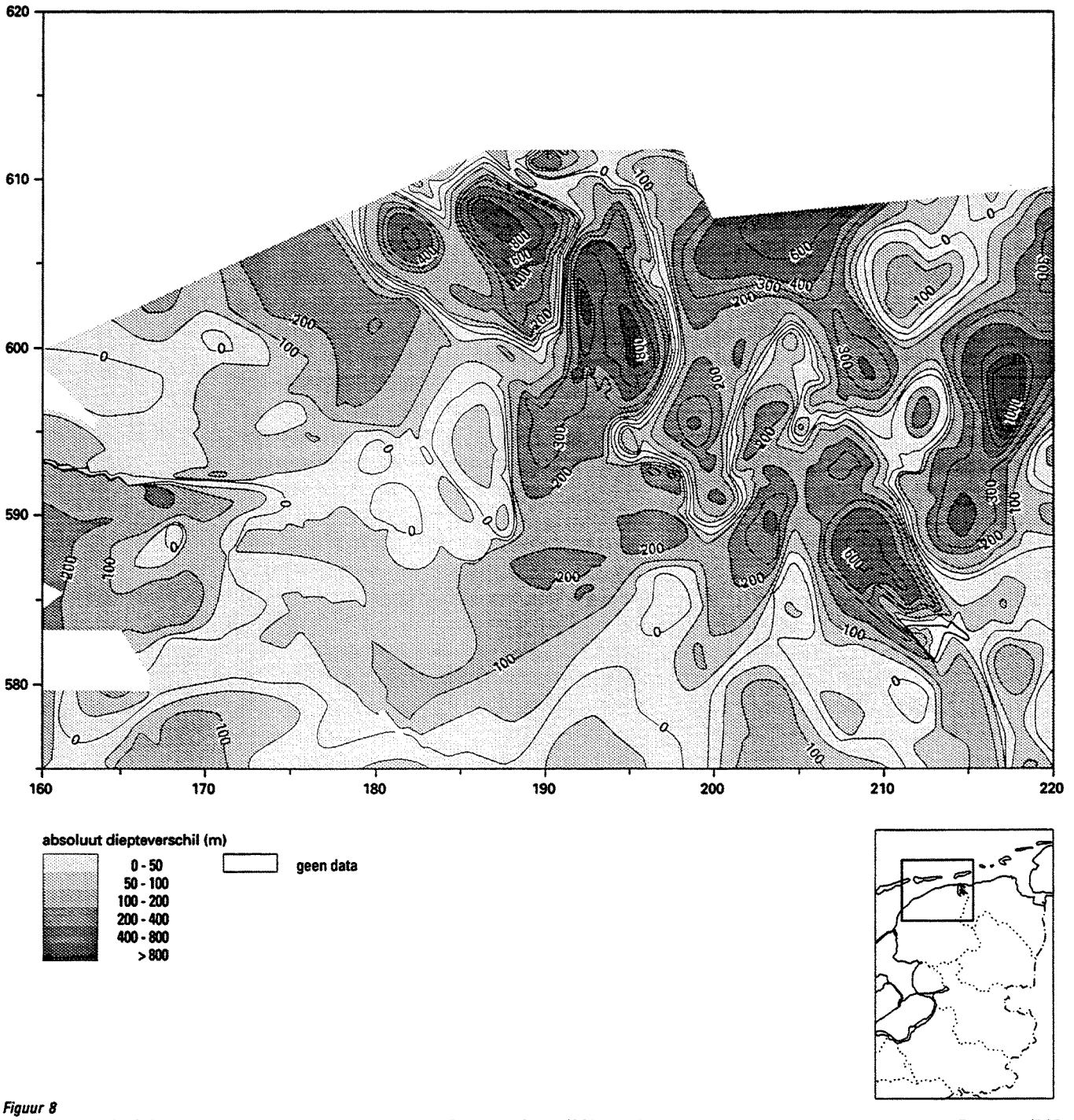


Figuur 7
Het diepteverschil (m) tussen kaartblad II, basis Noordzee Supergroep (RGD, 1992) en de dieptekaart basis Tertiair (RGD-10.371, 1984).

zoals bepaald met behulp van genoemde semivariogram en de geometrie van het grid van basisdata van de dieptekaart basis Tertiair en de dieptekaart top Zechstein, zijn kaarten te construeren van de plaatsafhankelijke standaarddeviatie van deze contourkaarten rond zoutstructuren (figuur 6). Hiervoor is een aantal aanvullende praktische aannames noodzakelijk:

1. De standaarddeviatie van de observatiefout van boringen en de seismische reflectie methodiek worden onafhankelijk van de structurele complexiteit gesteld.
2. De ondergrond die beschreven is door seismische sectie 8601N is representatief verondersteld voor Noord-Nederland.
3. De structurele complexiteit is identiek in alle richtingen.

De zo geconstrueerde kaarten bieden een aardige illustratie van de plaatsafhankelijke fout



Figuur 8
Het diepteverschil (m) tussen kaartblad II, de bovenzijde van de Zechstein Groep (RGD, 1992) en de dieptekaart van de bovenzijde van het Zechstein (RGD-6.009, 1984).

in de omgeving van een zoutstructuur. De representativiteit in dergelijke kaarten is op te voeren met betere, maar meer bewerkelijke, aannames.

Met behulp van de geconstrueerde standaarddeviatie kaarten van ruimtelijke data is een schatting gemaakt van de gemiddelde standaarddeviatie van de dieptekaart basis Tertiair en de dieptekaart top Zechstein. Voor de dieptekaart basis Tertiair en de dieptekaart top Zechstein is deze 30 m respectievelijk 300 m. Plaatselijk kan de standaarddeviatie van ruimtelijke data oplopen tot 100 m respectievelijk 750 m.

De geschetste methodiek is niet gevolgd bij de analyse van de gemiddelde standaarddeviatie van kaartblad II. Voor deze kaart zijn de op het kaartblad II geplotte boordieptes vergeleken met de diepte-indicatie uit het contourbeeld. Doordat deze boringen niet gebruikt zijn bij de constructie van het contourbeeld geeft dit ook inzicht in de plaatsafhankelijke standaarddeviatie van ruimtelijke data. Uit deze analyse volgt dat de gemiddelde standaarddeviatie van kaartblad II voor beide horizons, zeker voor wat betreft de top Zechstein horizon, geringer is dan bij de beide eerder beschreven kaarten.

Ter illustratie van de onnauwkeurigheid van contourbeelden, veroorzaakt door de plaatsafhankelijke standaarddeviatie van ruimtelijke data, zijn er contourkaarten van de verschillen geproduceerd door aftrekking van overeenkomstige gridpunten op kaartblad II (basis Tertiair) van de dieptekaart basis Tertiair (figuur 7) en van kaartblad II (top Zechstein) van de dieptekaart top Zechstein (figuur 8). De contourkaarten van de verschillen laten een tweetal constateringen toe:
1. De gevonden verschillen zijn aanmerkelijk geringer voor de basis Tertiair dan voor de top Zechstein.
2. Voor beide horizons geldt dat de verschillen binnen structureel eenvoudiger gebieden geringer zijn.

Deze observaties zijn goed te verklaren met de hiervoor gevonden standaarddeviaties van de observatiefout van boringen en seismische reflectie methodiek en de afhankelijkheid van deze waarden voor de structurele complexiteit, alsmede met de additionele contourfout.

Dit zou kunnen betekenen dat een niet te verwaarlozen deel van de relatief kleine zoutstructuren niet weergegeven zijn op de dieptekaart top Zechstein (RGD-6.009, 1984). Dit zou veroorzaakt kunnen zijn door een te geringe dichtheid van de gebruikte basisdata, waardoor deze kleinere zoutstructuren niet gedetecteerd zijn. Wanneer een zoutstructuur slechts marginaal aangetoond is, is het zeer waarschijnlijk dat de vorm incorrect op de kaart is weergegeven en dat de omvang van de zoutstructuur is overschat. Deze relatief kleine structuren zouden door kaartcorrecties achteraf een méér aanvaardbare geometrie gegeven kunnen worden, maar het is onzeker dat deze geometrie de werkelijke vorm beter benadert.

Afgeleide parameters
Op basis van voorgaande resultaten in het algemeen en de foutenkaartjes in figuur 6 in het bijzonder is getracht voor verschillende geometrieparameters bandbreedtes te bepalen.

Diameter van de zoutstructuur: Bij de bepaling van de diameters van verschillende zoutstructuren is gebruik gemaakt van de dieptekaart top Zechstein. Deze kaart is gebaseerd op niet gemigreerde seismiek. In dit kader wordt aangenomen dat de diameter van zoutstructuren bij niet- gemigreerde seismiek gemiddeld 50% overschat is. Doordat tevens de constructie van de dieptekaart top Zechstein gebaseerd is op een te geringe hoeveelheid data moet rekening gehouden worden met een extra overschatting, die voor deze kaart geschat is op 40% (RGD-30.101, 1992). De gemiddelde totale overschatting van de diameter van zoutstructuren bedraagt dan circa 100%.

Diepte van de top van de zoutstructuur: De bepaling van de diepte van de top van het zoutvoorkomen kan uitgevoerd worden met behulp van de dieptekaart top Zechstein waarbij de dieptekaart basis Tertiair of de interpretatie van de seismische lijn 8601N soms additionele informatie levert. De standaarddeviatie van de diepte van de top van de zoutstructuur kan geschat worden aan de hand van de waarde van de standaarddeviatie van ruimtelijke data ter hoogte van de top van de zoutstructuur. In hoofdstuk 3 worden deze standaarddeviaties gekwantificeerd.

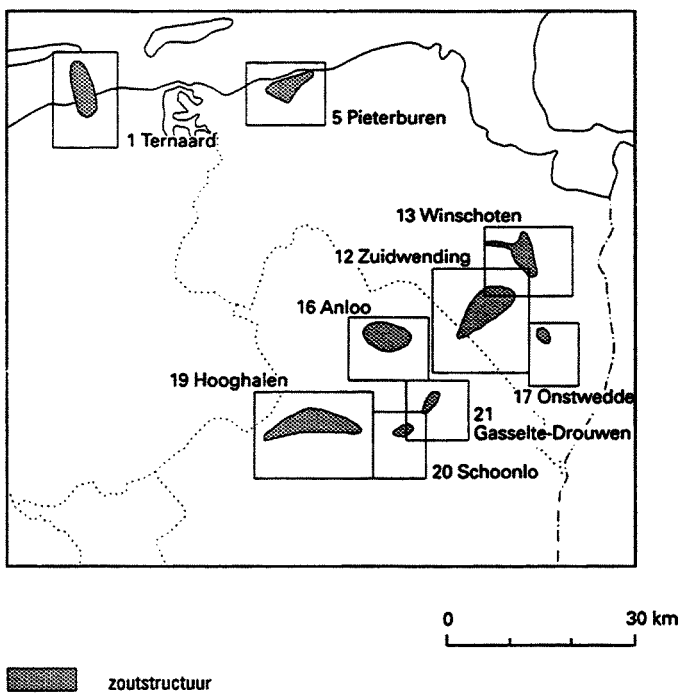
Dikte van de zoutstructuur. De totale dikte van het Zechstein kan worden afgeleid uit de voorgaande bepaling van de diepteligging van de top van het zoutvoorkomen. Die waarde wordt afgetrokken van de diepteligging van de basis Zechstein, verkregen uit trendanalyse (RGD-30.106, 1992). Wanneer schattingen van de standaarddeviatie van beide horizons beschikbaar zijn, kan de standaarddeviatie van de dikte van de zoutstructuur verkregen worden door geometrische optelling.

2.1.2 Beschikbaarheid van matig diepe gegevens nabij ondiepe zoutstructuren

In aansluiting op de inventarisatie in Fase 1 van het OPLA Programma is een aanvullende inventarisatie uitgevoerd van gegevens betreffende de matig diepe ondergrond. Hiermee wordt in deze studie het traject tussen 10 en 500 meter onder NAP bedoeld. De geïnventariseerde gegevens zijn afkomstig uit openbare bronnen en zijn oorspronkelijk voor andere doeleinden dan die in het OPLA Programma verzameld. In Fase 1 kon gezien de beschikbare tijd en de relatief grote hoeveelheid beschikbare gegevens betreffende de matig diepe ondergrond (in tegenstelling tot de diepe ondergrond) niet alles uitputtend geïnventariseerd worden.

Voor de aanvullende inventarisatie is rondom negen ondieper dan 1000 m gelegen zoutstructuren in Noordoost-Nederland (diepteligging volgens RGD-10.568, 1988) de beschikbaarheid geëvalueerd van basisgegevens voor met name de matig diepe ondergrond (figuur 9). Deze basisgegevens betreffen boringen, boorgatmetingen, sonderingen en geohydrologische puntgegevens. Het accent ligt op de matig diepe boringen.
Binnen de geselecteerde gebieden die elk afzonderlijk een zoutstructuur en het bijbehorende depletiegebieden omvat, bleken in totaal 1036 matig diepe boringen voor deze studie ter beschikking te staan (een depletiegebied is een gebied van waaruit zout gevloeid is en mogelijk nog vloeit naar een zoutstructuur). Hiervan bleken er 246 niet bruikbaar te zijn, onder meer als gevolg van een onvoldoende nauwkeurige beschrijving van het sediment. Van de overblijvende 790 boringen (100%) is van 350 boringen (44%) een bruikbare stratigrafische interpretatie beschikbaar; van 440 boringen (56%) ontbreekt deze nog (tabel 3).

De gemiddelde dichtheid van de bruikbare matig diepe boringen in de onderzochte gebieden is 1 per 1,6 km². De spreiding van de gegevens, zoals bepaald met de χ^2 methode, is echter meestal slecht. Met de beschikbare boringen is het mogelijk een regionaal beeld samen te stellen van de geologische opbouw van de ondergrond van de bovenste 50 m. Dieper dan 50 m neemt de



Figuur 9
Lokatie van een deel van de zoutvoorkomens in Noordoost-Nederland en de ligging van de geselecteerde gebieden nabij de ondiepe zoutstructuren.

Einddiepte	Met stratigrafische interpretatie	Zonder stratigrafische interpretatie	Totaal	Niet bruikbaar
0 - 50 m	154	268	522	147
50-100 m	142	112	254	93
>100 m	54	60	114	6
Totaal	350	440	790	246
	44%	56%	100%	

Tabel 3
Totaal hoeveelheid matig diepe boringen in de geselecteerde gebieden.

dichtheid van de gegevens snel af (1 boring/3,4 km²); de dichtheid van matig diepe boringen met een einddiepte tussen 50 en 100 m bedraagt 1 per 5,1 km², dieper dan 100 m 1 per 11,4 km².

55 Matig diepe en diepe boringen gaan vergezeld van één of meerdere boorgatmetingen. Hieronder zijn 22 diepe boringen (>500 m) die informatie over de zoutstructuren Pieterburen, Zuidwending en Winschoten leveren. De spreiding van deze gegevens is echter slecht. 50 Boorgatmetingen zijn gesitueerd in de nabijheid van drie zoutstructuren (Zuidwending, Winschoten, Anloo). Ook geldt bij deze gegevens dat de boringen vaak zijn gegroepeerd.

Sonderingen in de nabijheid van verschillende zoutstructuren bereiken diepten van maximaal enkele tientallen meters en dragen daarom nauwelijks bij aan een geologisch beeld van de matig diepe ondergrond.

Geohydrologische puntgegevens hebben een geringe verbreidingsdichtheid en bovendien hebben deze vaak slechts betrekking op het eerste watervoerende pakket.

Per zoutstructuur bestaan grote verschillen in dichtheid. De totale dichtheid van matig diepe boringen, de dichtheid van matig diepe boringen dieper dan 100 m, het aantal matig diepe en diepe boringen met één of meerdere boorgatmetingen en het aantal matig diepe boringen dat nog niet geïnterpreteerd is, werden per structuur vergeleken. Er konden twee groepen zoutstructuren worden onderscheiden (tabel 4).

Relatief veel boorgegevens zijn aanwezig bij Anloo, Zuidwending, Winschoten en Onstwedde. De hoogste dichtheid van matig diepe boringen wordt nabij Winschoten aangetroffen (1 per km²), de laagste dichtheid bij Onstwedde (1 per 2 km²). De grootste dichtheid van matig diepe boringen dieper dan 100 m wordt rond Anloo bereikt (1 per 4 km²), de laagste boordichtheid bij Onstwedde (1 per 9 km²). De meeste boorgatmetingen zijn voorhanden bij Zuidwending (22), de minste in de groep met relatief veel boorgegevens bij Onstwedde (4). Een goede spreiding van de matig diepe boringen bestaat er bij Anloo. Het grootste aantal stratigrafisch geïnterpreteerde matig diepe boringen is eveneens rond Anloo

Naam structuur	Dichtheid (km²/boring)	Dichtheid >100 m (km²/boring)	Aantal boringen met boorgatmetingen	Met stratigrafische interpretatie (%)	Beschikbare diepe boringen
Ternaard	3	130	-	15	-
Pieterburen	3	143	1	50	1
Zuidwending	1,5	6,1	22	38	9
Winschoten	1	5,8	19	35	12
Anloo	1,3	4	9	74	-
Onstwedde	2	9	4	40	-
Hooghalen	1,5	30	1	40	-
Schoonlo	2,5	-	-	45	-
Gasselte-Drouwen	1,5	60	-	50	-

Tabel 4
Een overzicht van de dichtheid van de matig diepe boringen, de dichtheid van de matig diepe boringen dieper dan 100 m, het aantal matig diepe en diepe boringen met boorgatmetingen, de hoeveelheid stratigrafisch geïnterpreteerde matig diepe boringen en het beschikbare aantal diepe boringen voor de geselecteerde gebieden.

aanwezig, namelijk 74%. Bij Winschoten daarentegen is slechts 35% van de matig diepe boringen stratigrafisch geïnterpreteerd.

De groep, met relatief weinig boorgegevens omvat Ternaard, Pieterburen, Hooghalen, Schoonlo and Gasselte-Drouwen. Hooghalen and Gasselte-Drouwen hebben hiervan de grootste dichtheid van matig diepe boringen, namelijk 1 per 1,5 km², Pieterburen en Ternaard de kleinste dichtheid (1 per 3 km²). De grootste dichtheid van matig diepe boringen met een einddiepte van méér dan 100 m wordt nabij Hooghalen bereikt en is 1 matig diepe boring per 30 km². Bij Pieterburen bevindt zich slechts 1 matig diepe boring per 143 km². Boorgatmetingen ontbreken in deze groep vrijwel geheel. Bij Gasselte-Drouwen heeft 50% van de matig diepe boringen een stratigrafische interpretatie, terwijl dit aantal bij Ternaard 15% bedraagt.

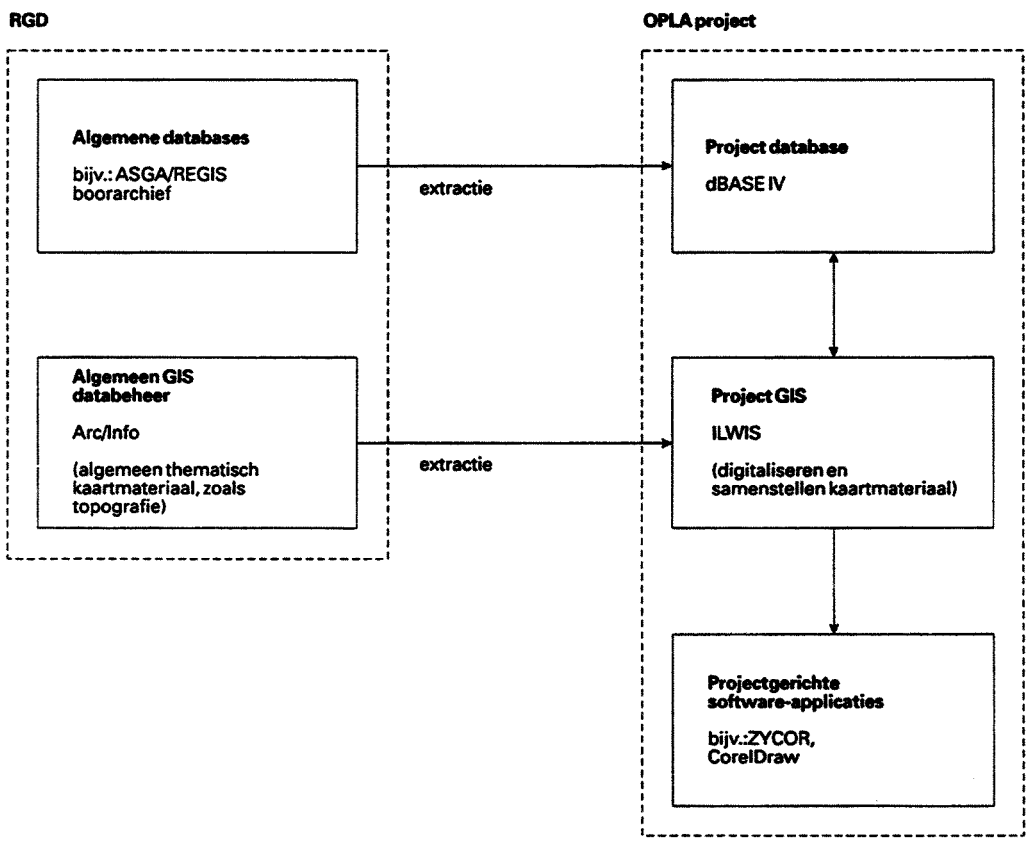
2.1.3 De ontwikkeling van een geautomatiseerd datasysteem

In de ruimtelijke gegevens die voor opslag in het datasysteem in aanmerking komen, worden verschillende typen onderscheiden, te weten puntgegevens (boringen), lijngegevens (contouren en breuken) en rooster-/rastergegevens. In het onderhavige onderzoek ging de aandacht uit naar lijn- en puntinformatie over de geometrie van geologische en hydrogeologische eenheden.
Het datasysteem is bestemd voor de opslag en bewerking van afgeleide gegevens. Basisgegevens uit boringen en seismiek, die gemakkelijk toegankelijk zijn in andere bestanden, worden niet in het project datasysteem opgeslagen. Zo wordt overlap met andere gegevensbestanden zoveel mogelijk vermeden.

De volgende toepassingen met het datasysteem zijn van belang: de kartering, mathematische en (geo)statistische analyse van gegevens, grafische presentatie en het aanmaken van invoerbestanden voor modelstudies.

In het aardwetenschappelijke onderzoek dat in het kader van het OPLA Programma uitgevoerd wordt, wordt gebruik gemaakt van openbaar beschikbare gegevens. Verschillende gegevensbronnen staan ter beschikking zoals de boorbestanden van ondiepe handboringen en matig diepe boringen (tot circa 500 meter) en kaart- en diepe boorgegevens in openbare rapporten en andere publicaties. De niet-gepubliceerde

Figuur 10
De opzet van het OPLA datasysteem en zijn positie ten opzichte van andere databases en GIS binnen de Rijks Geologische Dienst.



boorgegevens en seismische gegevens van de diepe ondergrond in Noord-Nederland zijn vanwege hun vertrouwelijkheid niet beschikbaar voor het onderzoek in het OPLA Programma.
De vele, in verschillende vormen gepubliceerde boor- en kaartgegevens die door de RGD sinds 1985 in het kader van het OPLA Programma geraadpleegd zijn, maakten het zeer wenselijk om een geautomatiseerd datasysteem op te zetten waarin de beschikbare gegevens op systematische wijze kunnen worden opgeslagen en kunnen worden opgeroepen.
Met een dergelijk datasysteem wordt het mogelijk om een beter inzicht te krijgen in de beschikbare oorspronkelijke punt- en lijninformatie en de geïnterpoleerde kaartgegevens. Voorts wordt de mogelijkheid om onderzoeksresultaten te verifiëren verbeterd. De efficiëntie en consistentie van toekomstige datamanipulaties wordt verhoogd.

De kern van het datasysteem bestaat uit een relationele database (dBASEIV) en een geografisch informatiesysteem (ILWIS). ILWIS is goed afgestemd op het gebruik in combinatie met dBASEIV. dBASEIV bezit de mogelijkheid om specifieke routines voor ILWIS te schrijven. Selecties van bestanden van boorgegevens of daaruit afgeleide gegevens, zoals ASGA en REGIS, kunnen voor de duur van een project in het datasysteem worden opgeslagen. Het project-GIS (ILWIS) is in staat om kaartbestanden van andere geografische informatiesystemen (zoals bijv. ARC/INFO) te importeren. ILWIS is een zeer geschikt stuk gereedschap om, al of niet in combinatie met andere software, kaartgegevens te compileren, te analyseren en te presenteren.
Met behulp van conversieprogramma's zijn opgeslagen bestanden om te zetten in leesbare bestanden voor andere applicatie-software, zoals het karteerprogramma ZYCOR en pakketten voor grafische presentatie zoals CorelDraw. De opzet van het OPLA datasysteem is schematisch in figuur 10 weergegeven.

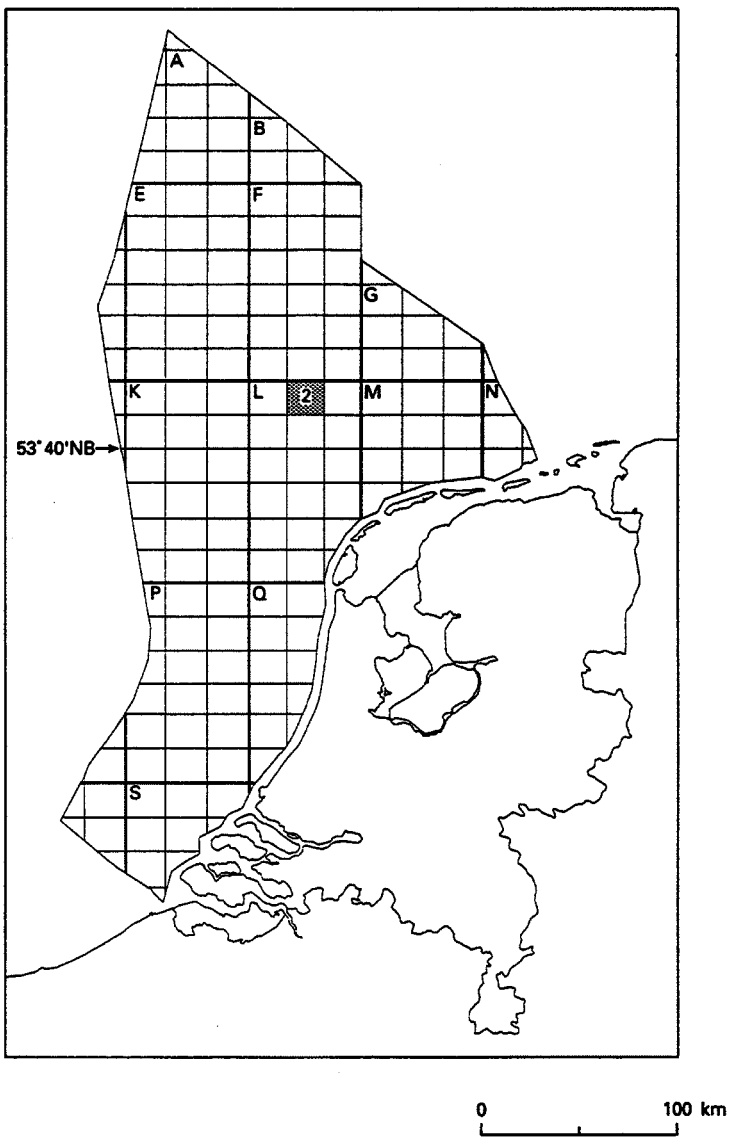
De gegevens zijn opgeslagen in een directorystructuur, waarbij een onderscheid is gemaakt tussen punt- en contourgegevens. Voor de opslag van contourgegevens zijn drie subdirectories onderscheiden. Het subdirectory Supra omvat alle kaarten die gebieden groter dan Nederland omvatten. Het subdirectory Regio omvat kaartmateriaal van Nederland of grotere regio's binnen Nederland. Het subdirectory Local omvat kaarten van gebieden die kleiner zijn dan de omvang van een provincie.
Elke opgeslagen kaart is voorzien van een unieke identificatiecode, die naast, een referentienummer, informatie bevat betreffende de schaal, de regio en het thema van de betreffende kaart. Alle opgeslagen kaarten zijn met relevante informatie getabelleerd in een dBASE-tabel Mapindex.
Boorgegevens zijn opgeslagen in dBASE-tabellen die in een aparte subdirectory Tabs van het betrokken kaart-subdirectory zijn ondergebracht. Een overzicht van alle tabellen is met nuttige informatie in de dBASE-tabel Tabindex weergegeven. De kenmerken van de Nederlandse zoutvoorkomens zijn in een afzonderlijke dBASE-tabel verwerkt.

De hoogste prioriteit is gegeven aan de opslag van contourkaarten en uitwisselbaarheid van deze kaarten met software voor kartering en grafische presentatie.
Een groot aantal kaarten is reeds in het kaartdirectory opgeslagen. Het betreft hier topografische kaarten op verschillende schalen (Nederland, N.W. Europa), dieptekaarten van hydrogeologische eenheden van Noordoost-Nederland en het modelgebied Zuidwending (samenwerkingsproject SESAM) en de lokatiekaart van de Nederlandse zoutvoorkomens.
dBASE-tabellen met verschillende typen informatie zijn samengesteld, bijv. een bestand met de kenmerken van de Nederlandse zoutvoorkomens, tijdelijke bestanden met lokatie en stratigrafische interpretatie van matig diepe boringen (10-500 meter), bestanden met gepubliceerde gegevens betreffende de diepte van de bovenzijde van het Zechstein in Noord- en Oost-Nederland.
Grafische presentaties van topografische informatie, lokatie van zoutvoorkomens en boorlokaties zijn met behulp van ILWIS voorbereid en zijn, in sommige gevallen, naar CorelDraw geëxporteerd. Voor meer details wordt verwezen naar het tussenrapport RGD-30.012DS (1993).

2.1.4 Hydrogeologische eigenschappen van Mesozoïsche eenheden nabij zoutstructuren in de Noordzee

Van de hydrogeologische eigenschappen van Mesozoïsche eenheden in de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland zijn weinig gegevens gepubliceerd. Daarom is een onderzoek uitgevoerd naar de hydrogeologische eigenschappen van Mesozoïsche eenheden. Hierbij is gekozen voor het bestuderen van mogelijke anomalieën zoals deze zich kunnen voordoen in de omgeving van zoutstructuren.
Aangezien niet-gepubliceerde gegevens van de diepe ondergrond van het vasteland van Noord-Nederland voor dit onderzoek niet beschikbaar zijn, is deze studie op het Nederlandse deel van het Continentale Plat waar een vrijgavetermijn van tien jaar geldt, uitgevoerd. Op het Continentale Plat zijn gebieden te vinden die sterke overeenkomsten vertonen met de ondergrond van Noord- en Oost-Nederland. Hierdoor zijn de onderzoeksresultaten van dit gebied extrapoleerbaar naar het vasteland.
Twee aspecten van Mesozoïsche eenheden nabij zoutstructuren zijn bestudeerd. Ten eerste is onderzocht in hoeverre zoutcementatie in Mesozoïsche aquifers nabij zoutstructuren kan leiden tot een verlaging van de doorlatendheid. Ten tweede is aandacht besteed aan de verhoging van de doorlatendheid in Mesozoïsche gesteenten boven zoutstructuren ten gevolge van breukvorming (en verkarsting).

Verhoging van de doorlatendheid
Door het opbreken van boven het zout liggende lagen zou de doorlatendheid binnen gesteenten boven de top van zoutstructuren kunnen



Figuur 11
Overzicht van Nederland en het Nederlandse deel van het Continentaal Plat. Blok L2 is met een "2" aangegeven.

toenemen (Hurst, 1983; Jorgensen & Andersen, 1991; Megson, 1991). De breukvorming is het gevolg van de, door het opstijgen van het zout ontstane, extensie in het afdekpakket. Een andere verklaring voor toegenomen permeabiliteit zou de verkarsting van kalksteen kunnen zijn wanneer deze als gevolg van zoutvloei in de nabijheid van de oppervlakte zou komen. Deze vergroting van de doorlatendheid is onderzocht door te kijken naar gerapporteerde boorspoelingsverliezen. In geen van de 64 beschikbare boringen van het Nederlands Continentale Plat zijn significante boorspoelingsverliezen gerapporteerd. Hieruit mag echter niet worden geconcludeerd dat permeabiliteitsverhoging niet plaatsgevonden heeft. Het ontbreken van boorkernmateriaal maakt een meer gedetailleerd onderzoek voorlopig echter niet mogelijk.

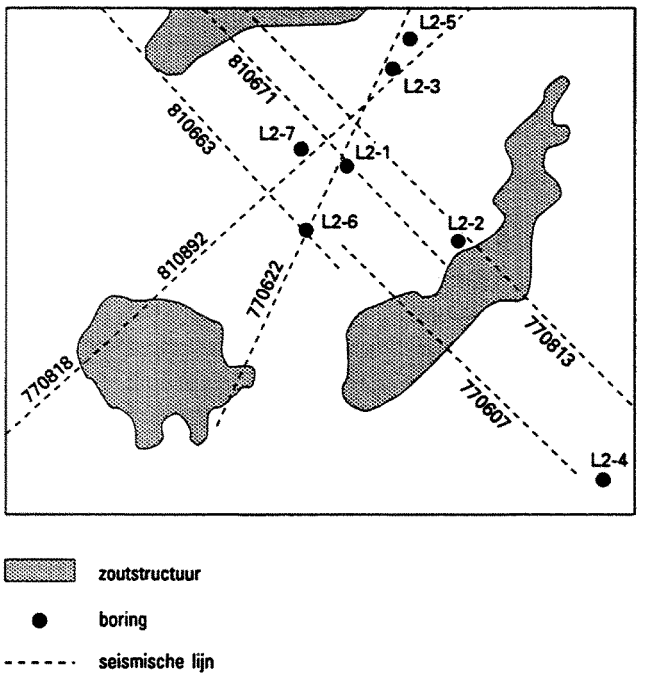
Verlaging van de doorlatendheid

Op basis van geologische analogieën en de beschikbaarheid van gegevens is gekozen voor een case-study gebied in blok L2 (figuur 11). Binnen dit blok zijn de boringen L2-1 t/m L2-7 beschikbaar voor onderzoek (figuur 12). De seismische lijnen die in figuur 12 zijn weergegeven, zijn gebruikt om inzicht te krijgen in de regionale geologische opbouw van het gebied. Regionaal ligt de bovenzijde van de Zechstein Groep in de omgeving van dit blok tussen de 4 en 5 km. Daarnaast bevinden zich drie grote zoutstructuren geheel of gedeeltelijk in blok L2 waarvan de toppen tussen de 1200 en 2000 m diep liggen. De zoutstructuren doorbreken de zandsteen reservoirs van de Trias, de Boven-Jura en het Onder-Krijt.

De kristallisatie van zouten in de poriënruimte kan vroeg (syn)sedimentair opgetreden zijn door insijpelen van zoutoplossingen uit de direct boven het reservoirgesteente liggende zoutformaties (Dronkert et al., 1989). Ook kan er miljoenen jaren later transport van opgelost zout uit naburige zoutlichamen hebben plaatsgevonden.

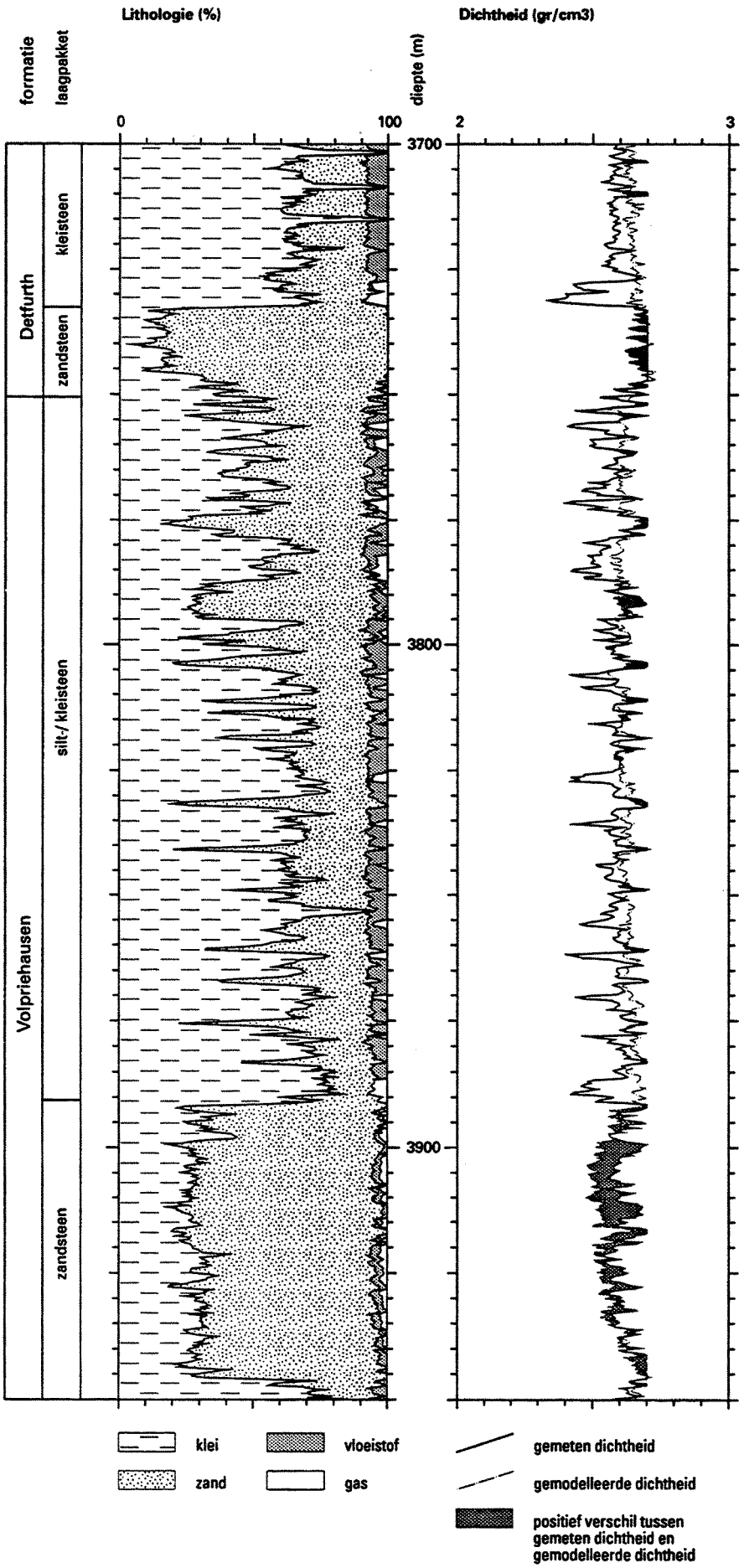
Ten behoeve van het onderhavige onderzoek is een cementatiemodel ontwikkeld waarmee de aanwezigheid van haliet als zoutcement met behulp van analyse van boorgatmetingen kan worden aangetoond (Serra, 1986a, b; Raymer et al., 1980). Op basis van afwijkingen tussen de theoretische en de gemeten waarden van de dichtheid en de transmissiesnelheid van bepaalde lithologische eenheden, kan een uitspraak worden gedaan over het cement type. De aanwezigheid van haliet zal een zandsteen pakket een lagere dichtheid en iets hogere transmissiesnelheid opleveren. Dit kan zichtbaar worden gemaakt door de gemeten dichtheid-log te combineren met een theoretisch bepaalde log (figuur 13).

Twee reservoirzones zijn middels dit model geanalyseerd: de Triadische Hoofd-Bontzandsteen Formatie (met de Volpriehausen



Figuur 12
Overzicht van blok L2 (ong. 20x17 km) met zoutkoepels waartussen zich een schildpadstructuur bevindt. Voor het onderzoek gebruikte seismische lijnen en putten zijn aangegeven.

Figuur 13
Weergave van de resultaten van de berekeneningen van het cementatiemodel voor het Volpriehausen en Detfurth Zandsteen interval in put L2-2. De eerste twee kolommen geven de stratigrafische indeling. Kolom drie de lithologische samenstelling; het watervolume, de effectieve porositeit, het schalievolume en het daaruit resulterende zandvolume (alle in procenten). De vierde kolom geeft de diepte onder maaiveld aan. De vijfde kolom geeft de gemeten dichtheid en de theoretische dichtheid van het gesteente weer. Het verschil tussen deze dichtheden is een indicatie voor de samenstelling van het aanwezige cement.

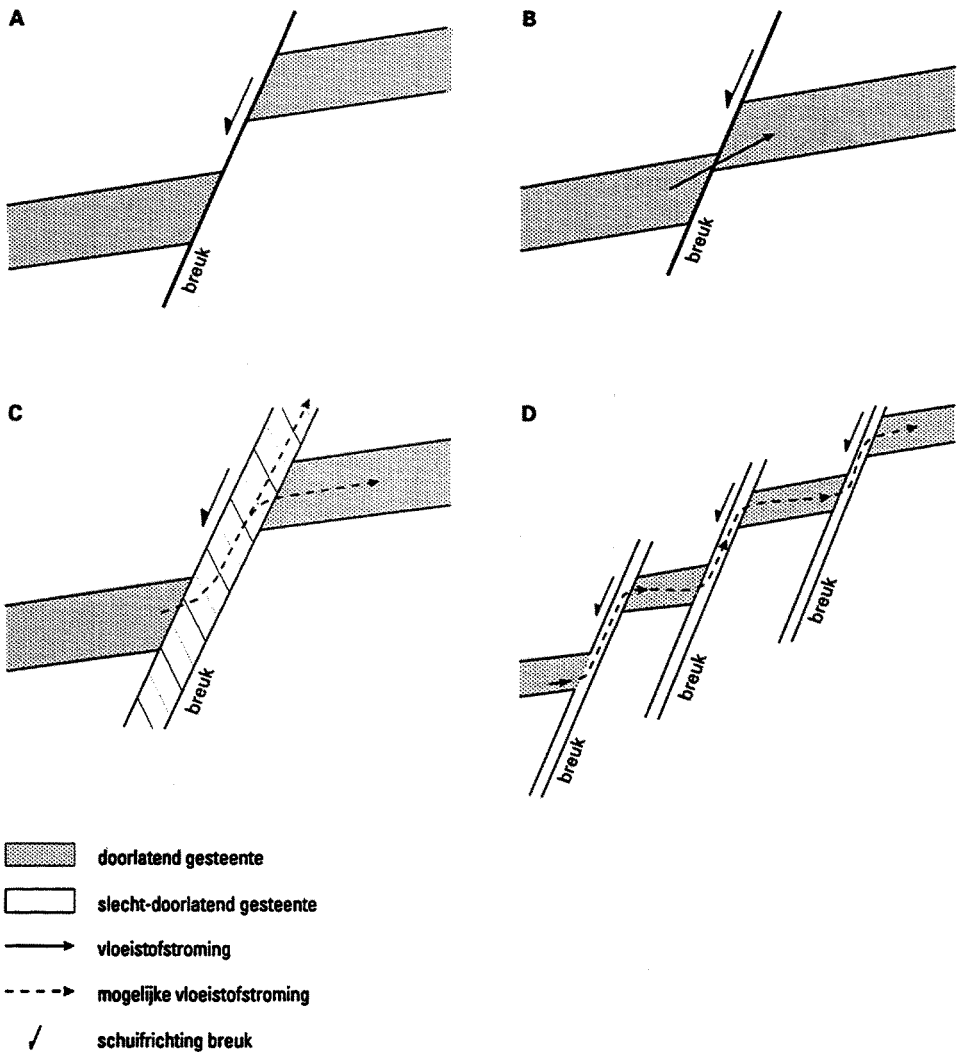


en Detfurth Zandsteen Laagpakketten als belangrijkste reservoirs) en de Delfland/Scruff Groenzand Formaties (Boven-Jura). Deze reservoirzones komen in een vergelijkbare samenstelling en onder overeenkomstige geologische omstandigheden in Noord-Nederland voor. Het Onder-Krijt (Vlieland zandsteen), dat wel in gedeelten van Noord-Nederland aanwezig is, ontbreekt in blok L2.

Het bleek dat in het Volpriehausen Zandsteen Laagpakket alleen in de boring L2-2 cementatie van zout was opgetreden. In de overige putten, die allen verder van de zoutstructuur verwijderd zijn, zijn mineralen met een hogere dichtheid geprecipiteerd. De zoutcementatie leidde tot een reductie in de porositeit tot 4,8%, terwijl de overige putten een porositeit van 13 tot 15% lieten zien.
Voor het Detfurth Zandsteen Laagpakket bleken alle putten zoutcementatie te vertonen. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat dit, gezien de sedimentaire facies, waarschijnlijk van primaire aard is.
Voor de Delfland en de Scruff Groenzand Formaties was het model niet toepasbaar. Dit werd veroorzaakt door de lithologische samenstelling waartoe een niet goed te kwantificeren deel organisch materiaal (ligniet) met een lage dichtheid behoort. In het model is dit materiaal niet van zout te onderscheiden.

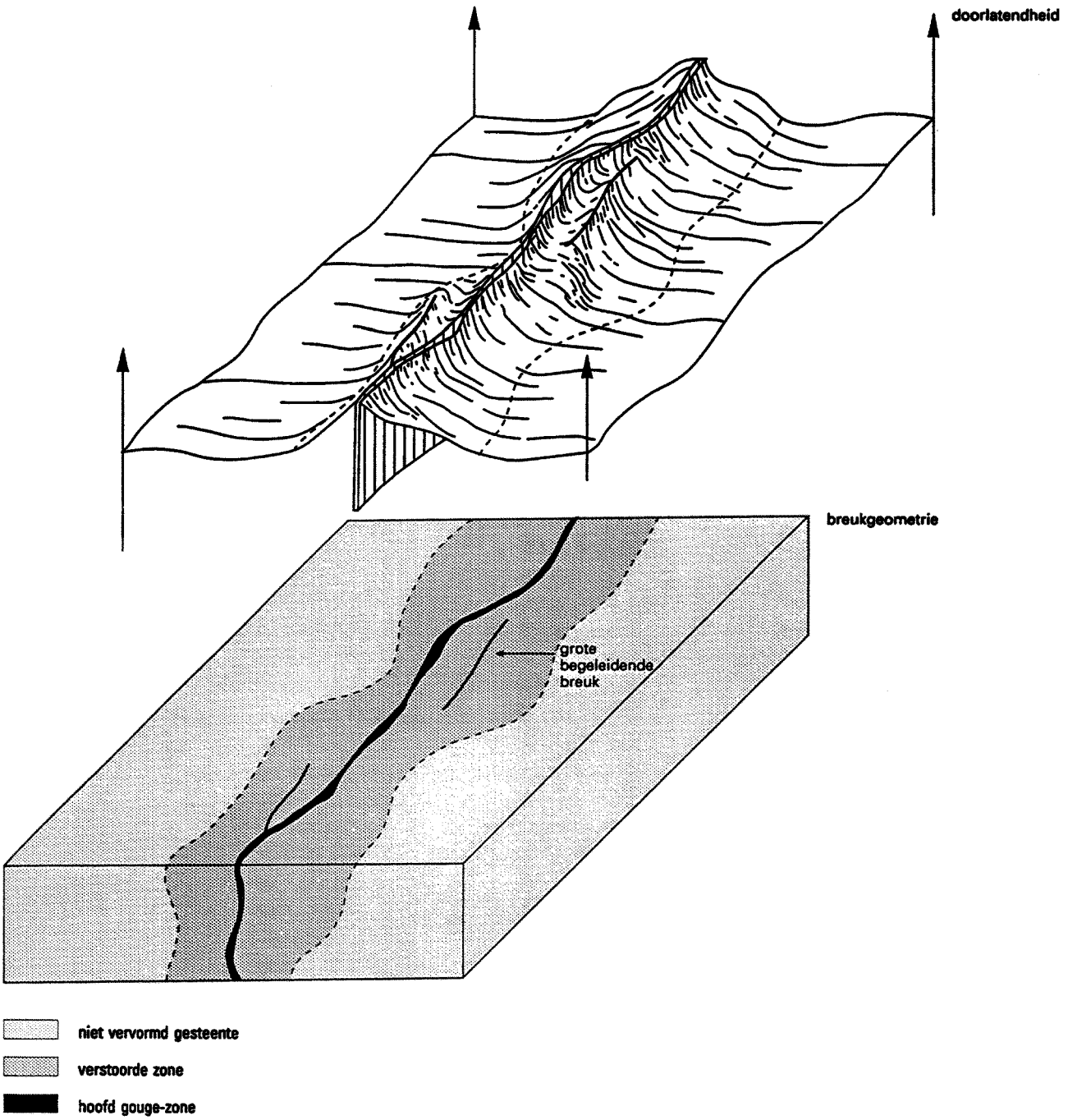
2.1.5 Hydrogeologische eigenschappen van breuken

In dit projectonderdeel is gewerkt aan een uitbouw van beschikbare gegevensbestanden betreffende de (hydro)geologische karakteristieken van breuken. Het onderzoek is gebaseerd op recente vakliteratuur. Er is met name aandacht besteed aan zogenaamde brosse breukvorming in grofweg de bovenste 4 km van de aardkorst. Bij brosse breuken in dit bereik zijn met name deformatieprocessen, de opbouw, de



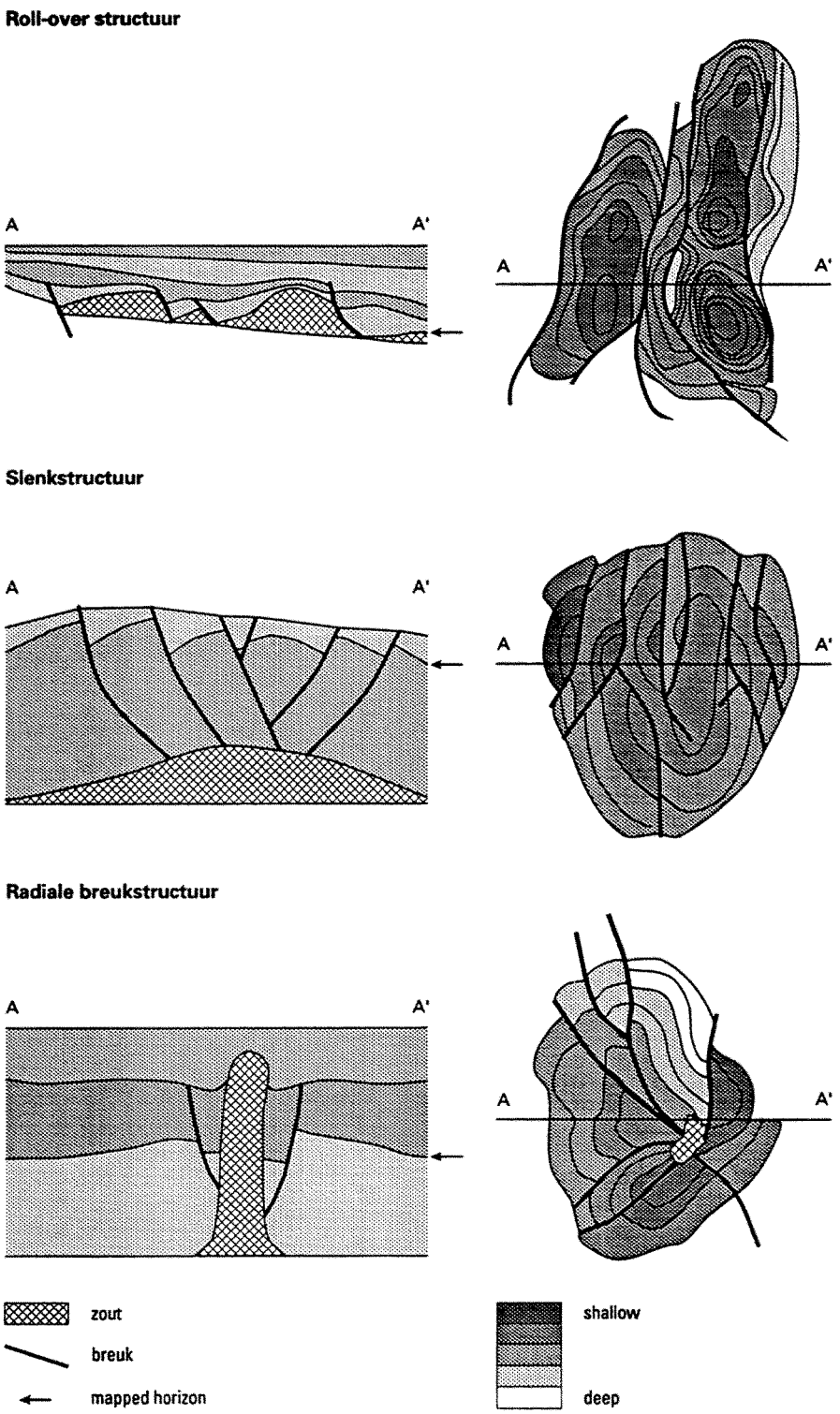
Figuur 14
Vloeistofstroming door breukzones. A. geen stroming; B. laterale vloeistof stroming door een breuk als functie van de permeabiliteit van het nevengesteente; C. laterale en parallelle vloeistofstroming door en langs een breukzone als een functie van de permeabiliteit van het breukgesteente; D. vloeistofstroming door "getrapte" structuur.

geometrie en de doorlatendheid van dit soort breuken van belang voor eventuele vloeistofstroming (figuur 14). Tevens is een globale evaluatie van de doorlatendheid van breuken boven en naast twee zoutstructuren (Pieterburen, Hoogezand) in de ondergrond van NO-Nederland uitgevoerd.
Bij lage alzijdige druk gaat de spanningsopbouw bij brosse breukvorming gepaard met een zekere mate van dilatatie. In ongeconsolideerde, korrelige afzettingen kan dit leiden tot een soort korrelvloei in breuken (Mandl et al., 1977). In harde gesteenten treedt dilatatie op door het ontstaan van open scheurtjes (fractures) in en naast breuken. Bij hogere alzijdige druk kan in breuken kataklase (korrelvergruizing) optreden



Figuur 15
Blokdiagram (onder) laat de breukgeometrie en de vervormingszones zien. De grafiek boven het blokdiagram geeft weer hoe de doorlatendheid in de omgeving van de breukzone varieert. De laagste doorlatendheid wordt aangetroffen in het centrale deel van de breukzone (de hoofd gouge-zone). Buiten deze zone neemt de doorlatendheid snel toe tot maximale waarden om dan min of meer geleidelijk af te nemen naar de meer perifere zones (naar Chester & Logan, 1986).

(Sammis et al., 1986), waardoor, afhankelijk van de mate van deformatie en van de gesteente-eigenschappen, een grof- tot fijnkorrelige breukstructuur ontstaat, respectievelijk breccie of gouge zones (een gouge heeft minder dan 30% grove korrels in een fijne matrix van klei). Latere fasen in de ontwikkeling van breuken kunnen gekarakteriseerd worden door de ontwikkeling van secundaire breukjes (Riedel shears) en foliaties (Riedel, 1929; Tchalenko, 1970; Rutter et al., 1986; Mandl, 1987; Hancock & Barka, 1987).
Breuken bestaan meestal uit één of meerdere breukzones van een zekere breedte, waarin het gesteente een bepaalde mate van deformatie heeft ondergaan. Als vuistregel voor de



Figuur 16
De voornaamste, aan zouttektoniek gerelateerde, breukpatronen die in onderzoeksgebied kunnen voorkomen (Fox, 1987).

verhouding tussen de breedte en de sprong-hoogte van de breuk kan 1:100 aangehouden worden.Uit gedetailleerde beschrijvingen van natuurlijke breuken blijkt dat breuken vaak gekenmerkt worden door onregelmatige, gebogen en gesegmenteerde breukvlakken. Meestal wordt een variatie in het verzet langs breuken waargenomen (Mandl et al., 1977; Chester & Logan, 1986).

Vloeistofstroming door breukzones is een functie van de permeabiliteit van:
1. het aangrenzende nevengesteente langs een breuk en
2. het breukgesteente binnen een breukzone (figuur 14).

In de eerste situatie zijn de belangrijkste parameters het verzet, de dikte en spatiëring van permeabele en impermeabele eenheden (de stratigrafische geometrie) en de oriëntatie van de gelaagdheid aan weerszijde van de breuk. In de tweede situatie kan de permeabiliteit van het breukgesteente binnen een breukzone door verschillende processen bepaald worden. Een hogere permeabiliteit ten opzichte van het niet gedeformeerde nevengesteente ontstaat door dilatatie in de breukzone en soms door kataklastische processen (breccie: Mandl, 1987; Hooper, 1991). De doorlatendheid kan tot een factor drie van de waarde van het niet gedeformeerde gesteente toenemen. Een lagere permeabiliteit ten opzichte van het ongedeformeerde nevengesteente kan ontstaan door kataklase (gouge), kleismering of klei-injectie, diagenese en de infiltratie van koolwaterstoffen. De doorlatendheid kan met drie grootte-ordes ten opzichte van de waarde van het niet gedeformeerde gesteente afnemen. De belangrijkste parameters voor het optreden van deze processen zijn de alzijdige druk, de normaalspanning op het breukvlak, het verzet of mate van deformatie langs een breukvlak en de gesteente eigenschappen (porositeit, permeabiliteit). Andere belangrijke factoren die vloeistofstroming door breukzones mede bepalen zijn breukgeometrie, tijd en het type vloeistoffen (Allen, 1989; Bouvier et al., 1989; Fowler et al., 1982). Veranderingen in de doorlatendheid kunnen in extreme gevallen tot enkele honderden meters vanaf het centrum van de breukzone traceerbaar zijn. Het mogelijke verloop van de doorlatendheid in de omgeving van een breukzone is weergegeven in figuur 15.

Boven en naast zoutstructuren kunnen door de opwaartse beweging van zouten breuken in het sedimentaire afdekpakket ontstaan. Hierbij zijn geometrie van het zoutlichaam en het spanningsveld belangrijke factoren (Whithjack & Scheiner, 1982; Koestler & Ehrmann, 1986, 1991). Karakteristieke breukpatronen zijn (figuur 16):
1. asymmetrische (listrische) roll-over structuren bij breuken langs de flanken van een zoutstructuur
2. slenkstructuren (collapse grabens) ontstaan door rekbreuken boven de zoutstructuur
3. radiale breuken geassocieerd met diapieren.

Ook in de ondergrond van Noordoost-Nederland zijn boven de top en naast de flanken van zoutstructuren veelal breuken aanwezig (RGD-10.568, 1988; RGD, 1992). Door het geringe aantal nauwkeurige gegevens is het thans niet mogelijk om met zekerheid de doorlatendheid van deze breuken kwalitatief of kwantitatief vast te stellen. Wel is het mogelijk om met de in dit onderzoek gepresenteerde breukmechanismen en parameters een (beter) overzicht te verkrijgen in de theoretische mogelijkheden voor de doorlatendheid van bovengenoemde breuken. De permeabiliteit van breuken in zanden van Tertiaire en Kwartaire ouderdom zal hoofdzakelijk bepaald worden door de werkzame deformatie-processen in die breukzones. Nauwkeurige gegevens hieromtrent ontbreken, de breukzones zullen echter vermoedelijk niet breder zijn dan maximaal 1 m, waardoor het volume vloeistof dat eventueel door de breukzone kan stromen gering zal zijn. Mogelijke breukzones in geconsolideerde gesteenten van Mesozoïsche ouderdom zijn vermoedelijk permeabel door de aanwezigheid van kleine, open breukjes en scheurtjes in en langs de breukzone. De permeabiliteit wordt negatief beïnvloed door de aanwezigheid van zout of ongeconsolideerde kleien (zoals in Tertiaire en Kwartaire afzettingen, en door diagenetische processen. Re-activatie van oude breukstructuren door toekomstige zoutbewegingen kan zowel een positief als negatief effect hebben op de permeabiliteit.

2.1.6 Conclusies en aanbevelingen

Betrouwbaarheidsanalyse

1. Van de boringen en de seismische gegevens, waarop de geanalyseerde ruimtelijke gegevens gebaseerd zijn, kan de standaarddeviatie van de observatiefout van dieptebepalingen oplopen tot

respectievelijk 2 en 125 m. Bij de constructie van de contourkaarten met behulp van deze basisgegevens treedt een additionele kaart-interpretatiefout op die toeneemt met de afstand tot het basisgegeven.
2. De onzekerheid in de diepte van de basis van het Tertiair is in het algemeen kleiner dan de diepte van de bovenzijde van het Zechstein, omdat met name de structurele complexiteit van het eerstgenoemde niveau beduidend minder is.

Aanvullende inventarisatie

3. Bij de negen ondiepe zoutstructuren waarvoor de aanvullende inventarisatie uitgevoerd is, staan in totaal 1036 matige diepe (10 tot 500 m diep) inclusief enkele diepe boringen ter beschikking. Van 350 boringen is een bruikbare stratigrafische interpretatie beschikbaar, van 440 boringen niet. De overige boringen (246) zijn niet bruikbaar voor dit onderzoek. De geografische dichtheid van de bruikbare boringen bedraagt gemiddeld 1 boring per 1,6 km². Boringen komen vaak in clusters voor.
4. Van de ondergrond tot 50 m -N.A.P. is met de beschikbare boringen een relatief betrouwbaar regionaal geologisch beeld op te bouwen. Sonderingen geven hier in geringe mate een aanvulling op. Slechts 14% van de bruikbare boringen bereikt een diepte groter dan 100 m. Er staan directe gegevens (beschrijvingen en boorgatmetingen) van 22 boringen tot in het zout ter beschikking.
In de omgeving van ondiepe zoutpijlers is gemiddeld 1 boring met een einddiepte groter dan 50 meter per 3,4 km² en 1 boring met een einddiepte groter dan 100 meter per 11,4 km² aanwezig. In de laatste categorie treden per lokatie van de zoutstructuur grote verschillen op: van 1 boring per 143 km² tot 1 boring per 4 km².

Hydrogeologische karakteristieken van Mesozoïsche eenheden

5. Er is een cementatiemodel ontwikkeld waarmee op basis van boorgatmetingen de aanwezigheid van haliet als zoutcement is aangetoond. Uit onderzoek aan twee zandsteen-pakketten in het blok L2 op de Noordzee blijkt dat in het Volpriehausen Zandsteen Laagpakket tot op enkele honderden meters van een zoutstructuur een anomale hoeveelheid zout aanwezig is die tot een reductie van de porositeit heeft geleid. Het maximale bereik van de door de zoutstructuren geïnitieerde zoutcementatie is minder dan 1,5 kilometer. Voorts blijkt dat in het Detfurth Zandsteen Laagpakket eveneens de porositeit door zout wordt gereduceerd. Dit kan echter voornamelijk worden toegeschreven aan een vroege aanrijking (Trias). Zo mogelijk reeds tijdens sedimentatie of vlak daarna door het insijpelen vanuit de bovenliggende Röt zoutlagen. Deze onderzoeksresultaten kunnen naar Noord- en Oost-Nederland worden geëxtrapoleerd gezien de overeenkomsten in stratigrafische opbouw, structureel raamwerk en geologische geschiedenis met het studiegebied. Dit betekent dat de aquifers rondom zoutstructuren in Noord- en Oost-Nederland door zoutaanrijking in de poriën kunnen zijn beïnvloed.

Hydrogeologische karakteristieken van breuken

6. Uit literatuuronderzoek is gebleken dat de breedte van de breukzone afhankelijk is van het verzet waarbij een verhouding van 1:100 als richtlijn hier is aangenomen. Naar de diepte toe neemt de breedte van de breukzones af door de verandering van de optredende processen (kataklase). Breukvlakken zijn vaak onregelmatig en kunnen in zowel verticale als horizontale richting gesegmenteerd zijn. Het verzet langs één breukvlak is in horizontale noch verticale richting constant.
7. De doorlatendheid dwars op een breukvlak wordt bepaald door de permeabiliteit van het nevengesteente aan weerszijden van de breuk. De doorlatendheid van de breukzone, die niet constant is, wordt, naast de eigenschappen van het verbroken gesteente zelf, bepaald door de breedte en de continuïteit van de breukzone.
- Onder lage alzijdige druk kan door dilatatie in breukzones een toename in permeabiliteit optreden ten opzichte van het nevengesteente. Deze toename kan 300% bedragen en zich (in afnemende mate) tot enkele honderden meters buiten de breukzone uitstrekken.
- Bij hogere alzijdige druk kan kataklase optreden waardoor de permeabiliteit verhoogd (breccie) of gereduceerd (gouge) kan worden. In het laatste geval is een afname van de porositeit van 50% en een daaraan gerelateerde afname van de permeabiliteit van 25-75%, tot zelfs 3 orden van grootte gebruikelijk.
- Als gevolg van mechanische processen, zoals kleismering of klei-injectie, zal de permeabiliteit op een bepaald punt van een breukzone altijd gereduceerd worden. Een kleipercentage van 25% is vaak voldoende om de breukzone ondoordringbaar te maken.

- In een afwisseling van competente (harde) en incompetente (zachte) gesteentelagen is breuksegmentatie niet uitgesloten; dit zal een negatief effect hebben op de permeabiliteit.
- Chemische processen, zoals diagenese en infiltratie van koolwaterstoffen, kunnen de permeabiliteit van een breukzone op den duur verlagen.

Aanbevelingen

1. De op seismiek gebaseerde, beschikbare verzameling basisgegevens kan kwalitatief worden verbeterd door gebruik te maken van ruimtelijke positionering (migratie) en van een accuraat snelheidsprofiel bij de tijd-diepte conversie. Een voldoende nauwkeurige weergave van structureel complexe gebieden, zoals de flanken van zoutpijlers, kan echter moeilijk op basis van 2D seismiek alleen verkregen worden.
2. Om de nauwkeurigheid van de informatie in contourkaarten te vergroten is een zodanige hoeveelheid basisdata noodzakelijk dat de gemiddelde onderlinge afstand tussen verschillende lokaties met basisdata in overeenstemming is met de ruimtelijke complexiteit van de te beschrijven structuur.
3. Het verdient aanbeveling de nog niet van een stratigrafie voorziene, boringen tot een diepte van 500 meter alsnog op deze wijze te interpreteren; hierbij dient prioriteit aan de diepste boringen nabij zoutstructuren gegeven te worden.
4. Om op efficiënte wijze de invloed van de zouten op de poriën in reservoirgesteenten te bepalen dient gebruik te gemaakt te worden van de allernieuwste boormetingstechnieken; met name van spectraal-logs voor gammastraling en dichtheidsbepalingen. Met behulp van de laatste techniek is het mogelijk een elementenanalyse te maken van de aanwezige gesteenten.
5. Boorkernen van het afdekkende gesteente dienen voorhanden te zijn om op directe wijze de vergroting van de permeabiliteit door breukvorming of verkarsting boven zoutpijlers vast te stellen en om de invloed van de zoutcementatie op de porositeit en permeabiliteit in aquifers te bepalen.
6. Voor toekomstig lokatiespecifiek onderzoek dienen gegevens te worden verzameld omtrent de lokale laagopbouw en voorkomende deformatiemechanismen (dilatatie, kataklase) of andere processen (kleismering, diagenese) die in breukzones kunnen zijn opgetreden. Hiermee kan een beeld worden gevormd van de configuratie van de permeabele en impermeabele lagen en de mogelijke permeabiliteit van de breukzones. Benodigde gegevens kunnen worden ontleend aan (hoge-resolutie) seismische profielen, boorkernen uit breukzones en permeabiliteitsmetingen van het breukgesteente.
7. Onderzoek naar de doorlatendheid van breuken zou zich in de toekomst kunnen richten op gegevens afkomstig uit de kolenmijnbouw in Limburg, en op relevante gegevens over de afsluitende capaciteit van breukbegrensde koolwaterstofreservoirs (migratie van koolwaterstoffen is niet in elk opzicht te vergelijken met grondwaterstroming).

Referenties

Allan, U.S. (1989). Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures. AAPG Bulletin, vol. 73, no. 7, p. 803-811.

Anderson, J.L., R.H. Osborne & D.F. Palmer (1983). Kataklastic rock of the San Gabriel fault - an expression of deformation at deeper crustal levels in the San Andreas fault zone. Tectonophysics, vol. 98, p. 209-251.

Aydin, A. & A.M. Johnson (1978). Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone. Pure and Applied Geophysics, vol. 116, p. 931-942.

Aydin, A. & A.M. Johnson (1983). Analysis of faulting in porous sandstones. Journal of Structural geology, vol. 5, no. 1, p. 19-31.

Bouvier, J.D., C.H. Kaars-Sijpesteijn, D.F. Kluesner, C.C. Onyejekwe & R.C. van der Pal (1989). Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria. AAPG Bulletin, vol. 73, no. 11, p. 1397-1414.

Chester, F.M. & J.M. Logan, J.M. (1986). Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, Cailfornia. Pure and Applied Geophysics, vol. 124, no. 1/2, p. 79-106.

Dronkert, H., S.D. Nio, W. Kouwe, N. van der Poel & Y. Baumfalk (1989) Exploration and production potential of the Buntsandstein - Non-exclusive Study Intergeos BV, 3 vol. 450 p.

Fowler, W.A, et al. (1982). Abnormal pressures in Midland Field, Louisiana. Study Group Report 1969-1971, Houston Geological Society, p. 48-77.

Fox, J. (1987). Seismic interpretation in salt-controlled basins. Geophysics: The leading

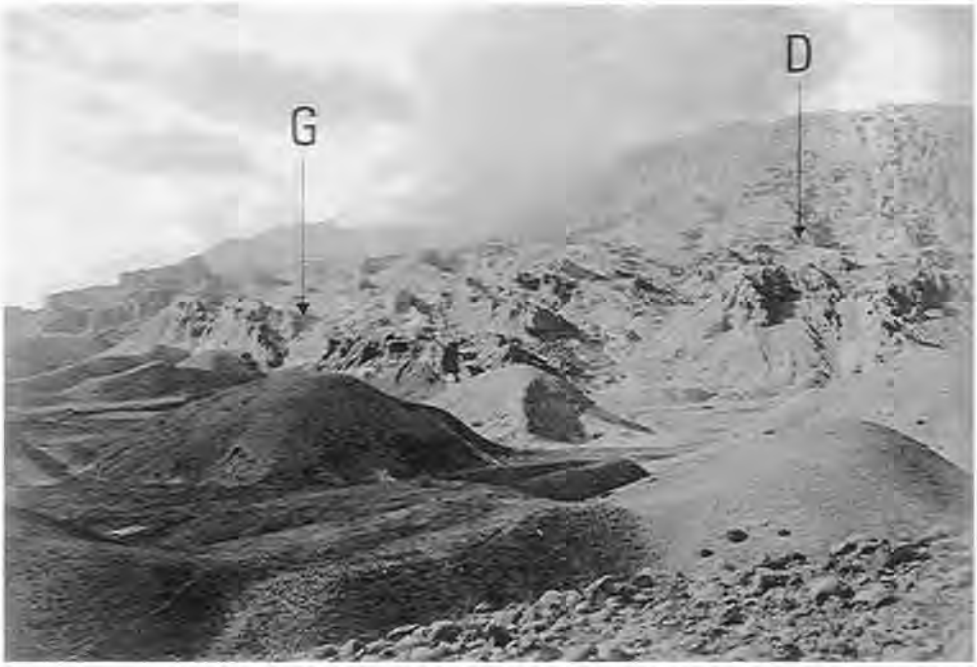
edge of exploration, vol. 6, no. 3, p. 11-18.
Hancock, P.L. & A.A. Barka (1987). Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey. Journal of Structural geology, vol. 9, no. 5/6, p. 573-584.
Hooper, E.C.D. (1991). Fluid migration along growth faults in compacting sediments. Journal of Petroleum Geology, vol. 14 (2), p. 161-180.
Hurst, C. (1983). Petroleum Geology of the Gorm field, Danish North Sea - Geologie en Mijnbouw, vol. 62 (1), p. 157-168.
Jorgensen, L.N. & P.M. Andersen (1991). Integrated study of the Kraka Field. SPE 23082, paper for the Offshore Europe Conference , Aberdeen.
Knipe, R.J. (1986). Faulting mechanisms in slope sediments: examples from DSDP cores. In: J.C. Moore (red.). Structural Fabrics in DSDP cores from Forearcs. Geological Society of America Memoir 166, p. 89-103.
Koestler, A.G. & W.U. Ehrmann (1986). Fault patterns in the calcareous overburden of a salt diapir: Laegerdorf, NW Germany. Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaeontologie, vol. 9, p. 555-569.
Koestler, A.G. & W.U. Ehrmann (1991). Description of brittle extensional features in chalk on the crest of a salt ridge (NW Germany). In: A.M. Roberts, G. Yielding & B. Freeman (red.). The geometry of Normal Faults. Geological Society Special Publication no. 56, p. 113-123.
Mandl, G., L.N.J. de Jong & A. Maltha (1977). Shear zones in granular material. Rock Mechanics, vol. 9, p. 95-144.
Mandl, G. (1987). Discontinuous fault zones. Journal of Structural geology, vol. 9, no. 1, p. 105-110.
Megson, J.B. (1991). The North Sea Chalk-play: Examples from the Danish Central Graben. Maersk Olie og Gas, Copenhagen.
Nybakken, S. (1991). Sealing fault traps - an exploration concept in a mature petroleum province: Tampen Spur, northern North Sea. First Break, vol. 9, no. 5, p. 209-222.
Pittman, E.D. (1981). Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones. Simpson Group (Ordovician),Oklahoma. AAPG Bulletin, vol. 65, no. 11, p. 2381-2387.
Ramsay, J.G. (1980). Crack seal mechanism of rock deformation. Nature, vol. 284, p. 135-139.
Raymer,L.L., E.R. Hunt & J.S. Gardner (1980). An improved sonic transit time-to-porosity transform. SPWLA 21st Ann. Log. Symp. Trans., Paper P.
Remmelts, G. & E.J.TH. Duin (1990). Results of a regional deep seismic survey in The Netherlands. In: B. Pinet & C. Bois (red.). The potential of deep seismic profiling for hydrocarbon exploration. Editions Technip, Paris, p. 335-343.
Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. Centralbl. f. Mineral., Abt B, p. 354-368.
Rijks Geologische Dienst (1984). Aut.: T.H.M. van Doorn & H. Speelman. Geologische en hydrogeologische inventarisatie van Tertiaire en Onder-Kwartaire afzettingen in Noord-Nederland ten behoeve van ondergrondse opslag en winning van warm water. Raportno.10.371.
Rijks Geologische Dienst (1984). Inventarisatie van slecht-doorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vasteland. Deel 1, 2, 3. Raportno. 6.009.
Rijks Geologische Dienst (1988). Aut.: M.C. Geluk & A.F.B. Wildenborg. Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland. Rapportno. 10.568, project GEO-1, OPLA Fase 1.
Rijks Geologische Dienst (1991). Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad I Vlieland-Terschelling. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
Rijks Geologische Dienst (1992). Geologische Atlasvan de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad II Ameland-Leeuwarden. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: A. Ruizendaal & E.K. Ruijs. Nadere analyse betrouwbaarheid van (hydro-)geologische gegevens. Rapport nummer 30.101, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.
Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: D. van Rees. Berekening van stijgsnelheden van zoutstructuren. Rapport nummer 30.106, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.
Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: M.A. Goossens. De opzet van een OPLA datasysteemvoor aardwetenschappelijke gegevens. Rapportno. 30.012DS/TRDS, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.
Rutter, E.H., R.H. Maddock, S.H. Hall & S.H. White (1986). Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. Pure and Applied Geophysics, vol. 124,

no. 1/2, p. 3-30.
Sammis, C.G., R.H. Osborne, J.L. Anderson, M. Banerdt & P. White (1986). Self-similar kataklasis in the formation of fault gouge. Pure and Applied Geophysics, vol. 124, no. 1/2, p. 53-78.
Serra, O. (1986a). Fundamentals of well-log interpretation 1. The acquisition of logging data ISBN 0-444-42132-7. Developments in Petroleum Science, 15A, 423 p.
Serra, O. (1986b).Fundamentals of well-log interpretation 2. The interpretation of logging data ISBN 0-444-42620-5. Developments in Petroleum Science, 15B, 684 p.
Sibson, R.H. (1977). Fault rocks and fault mechanism. Journal of the Geological Society of London, vol. 133, p. 191-213.
Tchalenko, J.S. (1970). Similarities between shearzones of different magnitudes. Bulletin of the Geological Society of America, vol. 81, p. 1625-1640.
Wallace, R.E. & H.T. Morris, H.T (1986). Characteristics of faults and shear zones in deep mines. Pure and Applied Geophysics, vol. 124, no. 1/2, p. 107-125.
Weber, K.J. (1987). Hydrocarbon distribution patterns in Nigerian growth faults structures controlled by structural style and stratigraphy. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 1, p. 91-104.
Withjack, M.O. & C. Scheiner (1982). Fault patterns associated with domes - An experimental and analytical study. AAPG Bulletin, vol. 66, no. 3, p. 302-316.

2.2 Enige aspecten van de interne opbouw van zoutstructuren

2.2.1 Inleiding

Over de interne opbouw van de Nederlandse zoutstructuren is niet veel bekend. In het project GEO-1 (RGD-10.568, 1988) kon alleen, op basis van de regionale opbouw van het Zechstein in Nederland, enkele goed beschreven gevallen in Duitsland en een paar aangeboorde pijlers in Nederland, een aanwijzing gegeven worden van de interne opbouw van zoutstructuren in de Nederlandse ondergrond.
Een mogelijkheid om het inzicht in de interne opbouw te vergroten is het bestuderen van zoutstructuren elders waarin mijnbouw is of wordt bedreven of zoutstructuren die aan het aardoppervlak komen. Een probleem dat hierbij speelt is dat deze zoutstructuren in een geologische omgeving ontstaan zijn die niet overeen hoeft te komen met de Nederlandse omstandigheden.
In het project GEO-1A zijn op drie verschillende plaatsen zoutstructuren onderzocht, te weten in Iran, Duitsland en Spanje. In Iran en Spanje betreft het dagzomende zoutstructuren. In Duitsland is de zoutpijler Gorleben onderzocht aan de hand van boorkernen die uit het steenzout afkomstig zijn.



Figuur 17 Zoutgletsjer Kuh-i-Namak ("zout-berg"), rechts op de achtergrond de koepelvormige top van de zoutdiapier (D) met op de voorgrond de gletschertong (G). Het boven het oppervlakte uitgestegen zout vloeit onder invloed van de zwaartekracht. Hierbij kan het zout zich enkele meters per jaar verplaatsen (Talbot & Rogers, 1980).

2.2.2 Zoutstructuren in Iran

In totaal zijn er meer dan 100 diapieren gevormd in het Zagros Gebergte en de Perzische Golf. Hiervan werden de Ganchin, Kuh-i-Angorah, Kuh-i-Pohl, Kuh-i-Namak ("zout-berg") en Kuh-i-Chaha ("gaten-berg") diapieren en het eiland Larak bezocht. In de diapieren werden naast verschillende soorten basaltische vulkanische gesteenten ook gesteenten van het basement aangetroffen.

Nadat het zout aan de oppervlakte is gekomen, is op diverse plaatsen nog horizontale zoutvloei opgetreden. Hierbij is het zout over het nevengesteente gevloeid. Dergelijke fenomenen worden beschreven als zoutgletsjers (Talbot, 1979; Kent, 1979). Bij Kuh-i-Pohl en Kuh-i-Namak werden dergelijke zoutgletsjers bezocht (figuur 17). In het zout treden subhorizontale isoclinale plooien op, terwijl in actieve zoutgletsjers het zout een gneiss-achtig tot mylonitisch uiterlijk heeft ten gevolge van de vervorming en rekristallisatie (zie ook figuur 18).

In de Dasht-i-Kavir ("grote zoutwoestijn") zijn meer dan 50 zoutdiapieren ontsloten. Het zout is van Eocene tot Oligocene (Lower Red Formatie) en Miocene (Upper Red Formatie) ouderdom. Een drietal zoutdiapieren werd bezocht, te weten nabij Garmsar, diapier 28 en 22 (zie voor lokatie: Jackson et al., 1990). Nabij Garmsar komen in de Lower Red Formatie rijke kalizoutlagen voor. In de nabijheid hiervan bevinden zich blauwe halietkristallen, met een grootte tot 10 cm (figuur 19). Bij diapier 28 bevindt zich scherpe overgang van nevengesteente naar zoutdiapier. Op het contact is een uit gips bestaande caprock van 2 m aanwezig. Het zout in de diapieren is sterk verplooid, met verticale assenvlakken.

Het voorkomen van blauw steenzout in Iran is mogelijk bruikbaar als een natuurlijk analogon voor het onderzoek naar stralingsschade. De ontsluitingen in Iran geven zeer aanschouwelijk weer op welke wijze zout intern gedeformeerd kan worden. Dit is nuttige kennis voor de beeldvorming betreffende de interne opbouw van Nederlandse zoutstructuren.

2.2.3 De zoutpijler Gorleben (Duitsland)

Bij de Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) te Hannover waar vele boorkernen van steenzout en caprock opgeslagen zijn, werd begin 1992 studie verricht aan zout uit de zoutdiapier Gorleben. Van het "Kristallbrockensalz", een zouteenheid in het bovenste deel van het Zechstein 2 Zout, werd een gesteente beschrijving gemaakt van de voorkomende structuren in de boringen GoHy 1161 en Go 1002. De boringen staan in het centrale gedeelte van de zoutpijler. Voor een gedetailleerde beschrijving van de zoutpijler Gorleben wordt verwezen naar Bornemann

Figuur 18
Isoclinaal verplooide primaire gelaagdheid van het zout met horizontaal assenvlak (Iran). De sterke deformatie heeft het zout een gneissachtig uiterlijk gegeven. Ondanks de sterke deformatie is de oorspronkelijke sedimentaire gelaagdheid bewaard gebleven.

(1991).

Uit het onderzoek kwam naar voren dat ook in halokinetisch vervormd steenzout nog structuren van primaire, sedimentaire, oorsprong aanwezig zijn, vergelijkbaar met beschreven voorbeelden uit niet halokinetisch verstoord zout in Polen (Czapowski, 1986; 1987).
De primaire structuren in het steenzout worden doorsneden door talloze breuken. Bewegingen langs deze breuken leidden tot het opbreken van grote steenzoutkristallen in kleinere kristallen. Uit de bestudeerde kernen bleek, dat een toename van de deformatie tot een afname van de kristalgrootte leidde. In de bestudeerde kernen werden geen aanwijzingen gevonden voor een sterkere rekristallisatie bij toenemende tektonische verstoring. Het optreden van carnalliet insluitsels gerelateerd aan breuken geeft aan dat langs deze breukvlakken vloeistoftransport plaats vond.

Aangezien de pijler Gorleben wat de regionale geologie betreft, overeenkomsten heeft met de Nederlandse structuren, hebben de bevindingen bij Gorleben een grote toepassingswaarde voor de Nederlandse zoutpijlers.

2.2.4 De zoutstructuur Cardona (Spanje)

In het najaar van 1992 werd in het kader van het project GEO-1A een voorbereidend veldwerk bij de zoutstructuur van Cardona uitgevoerd met een daaropvolgende werkexcursie. Deze structuur ligt op ca. 100 km ten noordwesten van Barcelona. In deze structuur is zout van Eocene ouderdom (Cardona Formatie) in reactie op compressieve spanningen door meer dan 1000 m afdekpakket heen gebroken (Pueyo et al., 1991). Het zout is uitstekend ontsloten in de Muntanya de Sal. De Cardona Formatie is opgebouwd uit een afwisseling van steenzoutbanken (5 cm) en kleilaagjes (figuur 20). Ook komen carnallietlagen voor. Bij het doorbreken van het afdekpakket is het zout sterk verplooid. De voorkomende brecciezones worden als bewegingszones geïnterpreteerd. Door interferentie van plooien is een complexe opbouw ontstaan (figuur 21), waarbij de plooien in het bovenste deel van de structuur uitwaaieren. Uit metingen bleek echter, dat het beeld van de plooien nog complexer is dan door Wagner et al. (1971) beschreven is. Op de structuur is geen caprock s.s. aangetroffen; het zout wordt discordant bedekt door kleiige sedimenten van Pliocene ouderdom.
De zoutstructuur van Cardona is een van de weinige plaatsen waar een goed ruimtelijk inzicht gekregen kan worden van de complexe interne opbouw van een zoutstructuur en is als zodanig een "must" voor elke zoutgeoloog. De structuur laat goed zien hoe het zout op verschillende ruimtelijke schalen, van enkele centimeters tot een kilometer, vervormd kan zijn. Als zodanig biedt de structuur van Cardona een goede basis voor de beeldvorming betreffende de interne

Figuur 19
Blauwe halietkristallen (in de afbeelding als donkere vlekken zichtbaar) in kalizoutlaag nabij Gamsar (Centraal-Iran). Lengte van pen is ca 10 cm.

opbouw van Nederlandse zoutstructuren.

2.2.5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

1. Uit het onderzoek aan steenzout boorkernen die afkomstig zijn uit een tweetal boringen in de zoutpijler Gorleben, kwam naar voren dat in halokinetisch vervormd steenzout nog structuren van primaire, sedimentaire oorsprong voorkomen. De primaire structuren in het steenzout worden doorsneden door talloze breuken. Bewegingen langs deze breuken leidde tot het breken van de grote steenzoutkristallen in kleinere kristallen. Uit de bestudeerde kernen bleek dat een toename van de deformatie tot een afname van de kristalgrootte leidde. Het sterkst gedeformeerde deel toonde alleen nog mozaïsche structuren. In de bestudeerde kernen werden geen aanwijzingen gevonden voor een sterkere rekristallisatie bij toenemende tektonische verstoring. De aanwezigheid van carnalliet langs breukvlakken geeft aan dat langs deze breukvlakken vloeistoftransport plaatsvond.

Aanbevelingen

1. Nadere studie aan vaste en vloeibare insluitsels in het steenzout van de pijler Gorleben zou het definitieve bewijs omtrent het ontstaan van de primaire structuren in dit steenzout moeten geven.
Een statistische analyse van de beschreven verschijnselen wordt aanbevolen, in het bijzonder wat betreft de oriëntatie van de breuken. Voorts dient onderzocht te worden in welke mate de beschreven structuren in Gorleben voorkomen in zoutstructuren in Nederland. Tevens dient een gedegen studie te worden uitgevoerd naar de implicaties van de gevonden structuren voor het mechanische gedrag van steenzout.
2. Systematisch onderzoek aan dagzomende of gemijnde zoutstructuren leidt tot een beter inzicht in de interne opbouw van zoutstructuren in de Nederlandse ondergrond, met name betreffende de structurele complexiteit. Het wordt aanbevolen om dit type onderzoek voort te zetten.

Referenties

Bornemann, O. (1991). Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnisssen. Bundesamt f. Strahlenschutz Schriften, Salzgitter, 4/91, 67 p.

Czapowski, G. (1986). Internal lamination in halite rock. Przglad. Geologiczny Warszawa, vol. 34, p. 202-204.

Czapowski, G. (1987). Sedimentary facies in the oldest rock salt (Na1) of the Leba elevation (Northern Poland). In: T.M. Peryt (red.). Lect. Notes in Earth Sci., vol.10: The Zechstein Facies in Europe , p. 207-224.

Jackson, M.P.A., R.R. Cornelius, C.H. Craig, A. Gansser, J. Stöcklin & C.J. talbot (1990). Salt diapirs of the great kavir, central iran. Geol. Soc. of Amer. Mem. 177, 139 p.

Figuur 20
Isoclinale plooien met vrijwel verticaal assenvlak, dunne donkere kleibandjes en lichte zoutlagen wisselen elkaar af in de zoutstructuur van Cardona. Ongeveer in het midden is een brede donkere band waarneembaar met daarin ingesloten solitaire lichte brokken (C). Dit is een paarsrode breccieuse carnallietbank. Carnalliet deformeert gemakkelijker dan steenzout waardoor de deformatie zich hier zal concentreren.

Kent, P.E. (1979). The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. Journ. Petr. Geol., vol. 2, p. 117-144.
Pueyo, J.J., J. Verges & J.M. Salvany (1991). Salt related structures in northern Spain. Excursion Guide, Univ. of Barcelona.
Talbot, C.J. (1979). Fold trains in a glacier of salt in southern Iran. Structural Geology, 1, p. 5-18.
Wagner, G. von, F. Mauthe & H. Mensink (1971). Der Salzstock von Cardona in Nordspanien. Geol. Rundschau, 60, p. 970-996.

2.3 Zoutbeweging

2.3.1 Inleiding

Het projectonderdeel Zoutbeweging valt in drie delen uiteen. Allereerst betreft dit een onderzoek naar de ontstaansgeschiedenis van de zoutstructuren in Nederland. Dit onderzoek heeft zich vanwege de beperkte beschikbaarheid van data primair gericht op de noordelijke helft van het Nederlandse deel van het Continentaal Plat. Op grond van de nieuw beschikbaar gekomen data betreffende Noordoost-Nederland (RGD-30.010, 1990; RGD, 1991b; Remmelts & Duin, 1990), alsmede op grond van eerder onderzoek (RGD-10.568, 1988), is vastgesteld dat de waarnemingen gedaan op het Continentaal Plat in principe extrapoleerbaar zijn naar het vaste land.

Figuur 21
Complexe multifase plooien in de Cardona zoutstructuur. De afwisseling van dunne donkere kleibandjes en lichte zoutlagen maakt de structuren duidelijk waarneembaar (in de linker onderhoek staat een munt voor de schaal).

Dit projectonderdeel beantwoordt aan de eerste doelstelling, het analyseren en vaststellen van de variatiebreedten in effecten van geologische processen in de ondergrond welke van invloed zijn op het ontstaan van zoutstructuren. Tevens dienen de resultaten van dit onderdeel als basis voor het evalueren van het, als laatste beschreven, processimulatie model voor zoutbeweging.

Het tweede onderzoekspunt betreft de stijgsnelheden van zoutstructuren in de ondergrond van de Noordzee en van Noordoost-Nederland. Voor verschillende structuren zijn voor een aantal geologische perioden berekeningen gemaakt van de stijgsnelheden. De hiervoor door de RGD ontwikkelde methodiek (RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990) is verder verbeterd. Dit betreft met name de compactie correcties. Dit projectonderdeel beantwoordt aan de doelstelling de variatiebreedten in de uitkomsten van het onderzoek gedurende Fase 1 te analyseren en te evalueren. De resultaten van dit onderzoek zijn van direct belang voor de veiligheidsstudie PROSA en vormen een controle op de uitkomsten van de modelstudies (onderdeel C1 van project GEO-1A en het project GEO-4A door de VUA).

Tenslotte is in het derde deel van deze studie aandacht besteed aan het modelleren van zoutbeweging. Op basis van een literatuurstudie, met de resultaten van de eerste twee onderdelen als randvoorwaarden, is bestudeerd wat de optimale wijze is om de significante geologische processen te modelleren en welke parameters daarbij van belang zijn. Dit laatste onderdeel valt onder de doelstelling om processen in de ondergrond te evalueren en het ontwikkelen van processimulaties. Parallel aan het onderzoek bij de RGD werd bij de Vrije Universiteit van Amsterdam (VUA) gewerkt aan een numeriek model voor halokinese. Beide instellingen hebben geprofiteerd van de onderlinge contacten in dit verband en van de wederzijdse uitwisseling van resultaten.

2.3.2 De bewegingsgeschiedenis van zoutstructuren in de Noordzee en Noordoost-Nederland

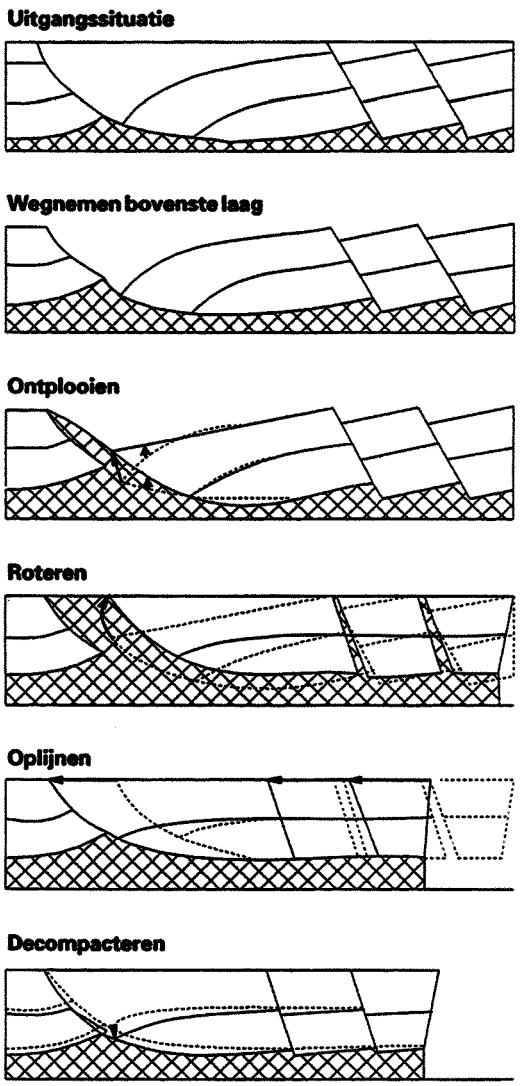
Inleiding

Dit projectonderdeel behelst een studie naar de structureel-geologische ontwikkeling van zoutstructuren. Hierbij wordt de aandacht gericht op de ruimtelijke opbouw van de zoutstructuren, de afdekkende lagen en de ontwikkelingsgeschiedenis. Deze studie is gewijd aan de zoutstructuren voorkomend op het Nederlandse deel van het Continentaal Plat. Aanleiding hiertoe vormde de veel grotere hoeveelheid beschikbare gegevens voor die regio dan voor Noordoost-Nederland.

Bij de uitvoering van het onderzoek op de Noordzee hebben de volgende vragen het raamwerk van het onderzoek bepaald:

1. Wat zijn de overeenkomsten en de verschillen tussen de structuren in het gebied van de Noordzee en het onderzoeksgebied in Noordoost-Nederland?
2. Welke zoutstructuren in de ondergrond onder de Noordzee zijn goed vergelijkbaar met die in het onderzoeksgebied zelf en op welke gronden?
3. Hoe ziet de ruimtelijke opbouw van de zoutstructuren en de afdekkende lagen eruit?
4. Wat is de ontwikkelingsgeschiedenis van de zoutstructuren onder de Noordzee?
5. Hoe hangt deze samen met de regionaal sedimentair-tektonische ontwikkeling?
6. Met welke snelheid groeiden de zoutstructuren en wat kan men vaststellen over de zoutbalans?

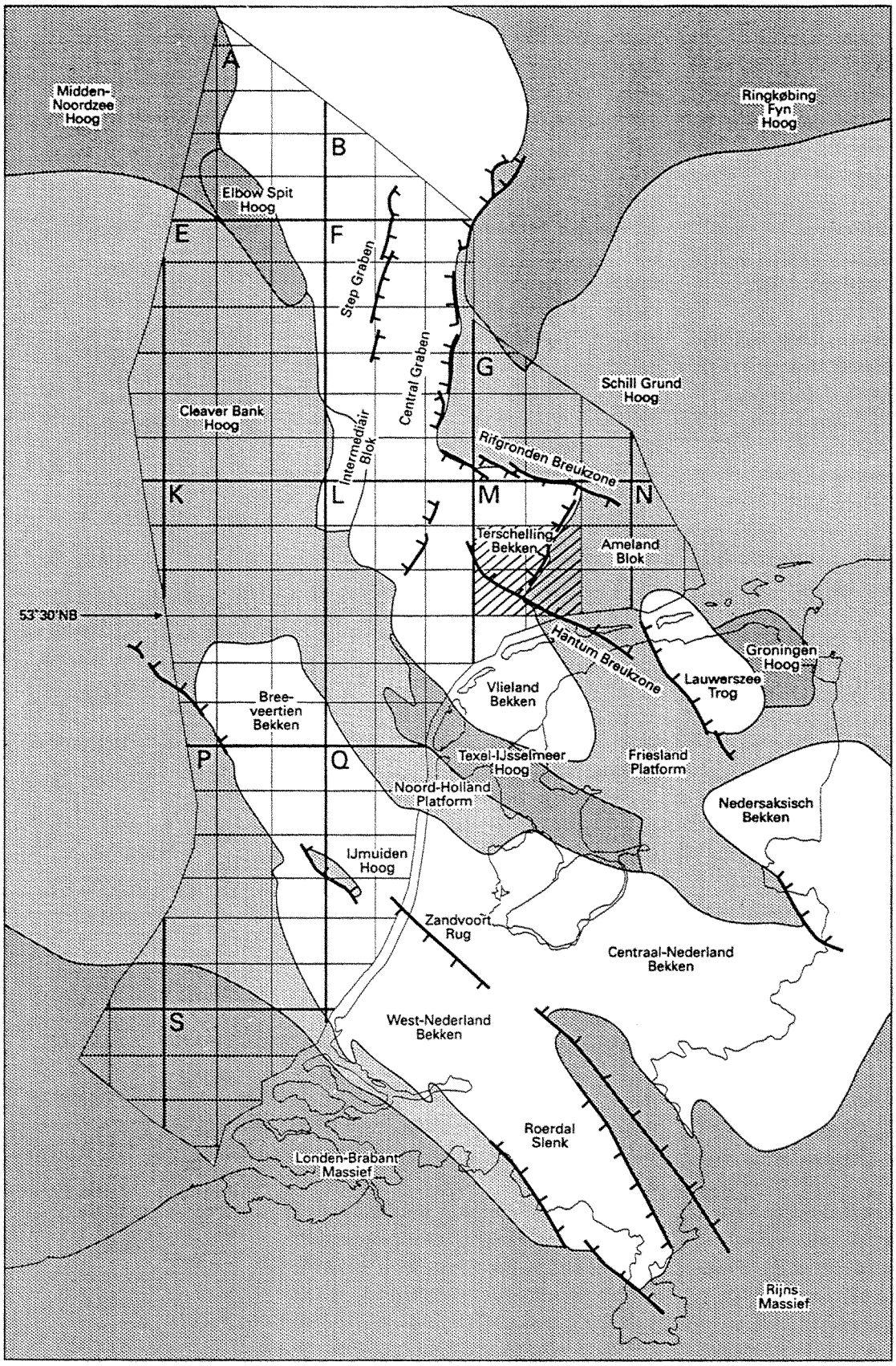
Om de vaak complexe interactie tussen sedimentatie en deformatie te begrijpen is gebruik gemaakt van een nieuw software programma RESTORE. Met behulp van dit programma is het mogelijk structurele profielen te reconstrueren (balancing). Dit software pakket, ontwikkeld door het Bureau of Economic Geology van de universiteit van Texas, is speciaal toegesneden op deformatie onder invloed van extensie waarbij een plastisch deformerende onderlaag (zout) betrokken is. Via een aantal aannamen verloopt de reconstructie door het verwijderen van opeenvolgende lagen en deformaties, van door breuken (of profiel uiteinden) begrensde blokken. De blokken worden elk van de toplaag ontdaan, ontplooid, geroteerd, opgelijnd en gedecom-pacteerd zodanig dat weer een rechte, aaneen-gesloten bovenste horizon ontstaat (figuur 22).



Figuur 22
Sequentie van handelingen bij het reconstrueren van een structureel profiel met behulp van RESTORE (naar Schulz-Ela & Duncan, 1991).

Regionaal geologische karakterisering van Noordoost-Nederland

Daar de resultaten van dit onderzoek alleen naar Noordoost-Nederland extrapoleerbaar zijn wanneer de geologische setting en geschiedenis onderling sterke gelijkenis vertonen, diende dit te worden getoetst. Hiertoe zijn de resultaten van het onderzoek op de Noordzee vergeleken met de typering van Noordoost-Nederland is opgesteld door de RGD (RGD-10.568, 1988). Deze typering van de regionale geologie van Noordoost-Nederland met referentie naar de zoutbewegingen is gebaseerd op de voorkomende stratigrafische niveaus, hun samenstelling, dikte en diepte, alsmede op de vorm



case-study gebied

0 100 km

Figuur 23
Kaart van de structurele eenheden van Nederland. Aangegeven is 53°30'NB, de zuidgrens van het studiegebied. In het noorden zijn de structurele elementen voornamelijk N-Z gericht terwijl naar het zuiden toe de NW-ZO richting gaat domineren. Het studie gebied in de M-blokken is met een arcering aangeduid.

bewegingsgeschiedenis en lokatie van de voorkomende zoutstructuren. Waar mogelijk, is de typering aangevuld met nieuw gepubliceerde gegevens betreffende het gebied (Remmelts & Duin, 1990; RGD, 1990; 1991a; b). De nieuwe gegevens bestaan uit diepteprofielen en seismische lijnen over de zoutstructuren Klein-Ulsda, Onstwedde, Gasselte-Drouwen, Ternaard en Gerkesklooster en geologische kaarten inclusief toelichting van Noord-Friesland.

Een vergelijking van de bovengenoemde typering met de geologische setting in het studiegebied op de Noordzee heeft aangetoond dat er grote overeenkomsten bestaan. De hierna beschreven fenomenen betreffende de zoutstructuren in de ondergrond van de Noordzee blijken alle eveneens op te gaan voor Noordoost-Nederland.

Structureel geologische ontwikkeling van de zoutstructuren op de Noordzee

Het onderzoek heeft zich geconcentreerd op het noordelijk deel van het Nederlandse Continentaal Plat (ten noorden van 53°30', figuur 23). Dit gebied komt regionaal geologisch gezien het beste overeen met Noordoost-Nederland. Het gebruikte databestand bestond uit een regionaal netwerk van seismische lijnen van ongeveer 2000 km lengte dat beschikbaar gesteld is door Nopec/Geco-Prakla. Op de seismische lijnen zijn tientallen zoutstructuren weergegeven. Voorts stonden verschillende boringen ter beschikking. De geologie van het noordelijke deel van het Continentale Plat wordt beheerst door een Mesozoïsche riftstructuur (Central Graben) die het gebied, ongeveer N-Z, in tweeën deelt (Heybroek, 1975; Ziegler 1990). Naar het zuiden toe wordt de NW-ZO richting geleidelijk dominant (figuur 23). Er bestaan wat betreft de structurele geschiedenis en de stratigrafische sequentie grote overeenkomsten met Noordoost-Nederland.

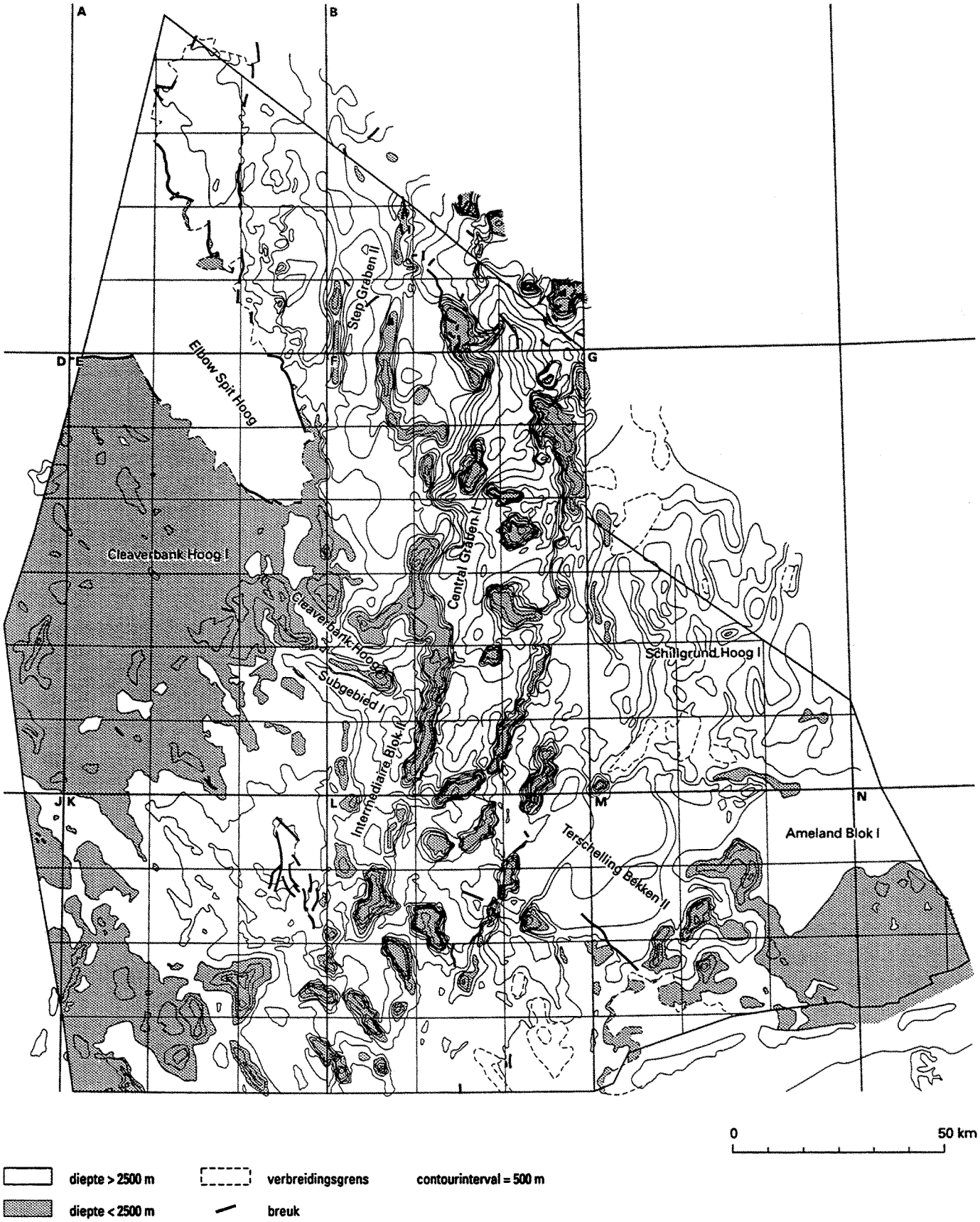
Het is gebleken dat er een directe relatie bestaat tussen de zoutstructuren en de structurele geschiedenis van een bepaald gebied. Zo zijn de zoutstructuren op basis van hun ontwikkelingsstadium te groeperen in zogenaamde zoutprovincies overeenkomstig de structurele eenheden. Enerzijds zijn dit de relatief stabiele, hooggelegen gebieden die de Central Graben flankeren, anderzijds zijn dit de periodiek sterk bewegende gebieden zoals de Central Graben zelf, het Terschelling Bekken, de Step Graben en het Intermediaire Blok (figuren 23 & 24). Deze indeling komt sterk overeen met die door de RGD voorgesteld voor Noordoost-Nederland (RGD-10.568, 1988).

Het stadium van ontwikkeling van de zoutstructuren hangt nauw samen met de intensiteit van deformatie in het betreffende gebied. De zoutstructuren op de relatief weinig gedeformeerde structurele hogen hebben maximaal het kussenstadium bereikt, terwijl in de sterk door breuken bepaalde Central Graben enorme diapiere structuren zijn ontstaan. Ter plaatse van breuken met een groot verzet die lateraal over grote afstand vervolgbaar zijn, ontstaan langgerekte zoutwallen (figuur 24). De lokatie waar zoutvloei optreedt, wordt bepaald door onregelmatigheden in het substraat (breuken).

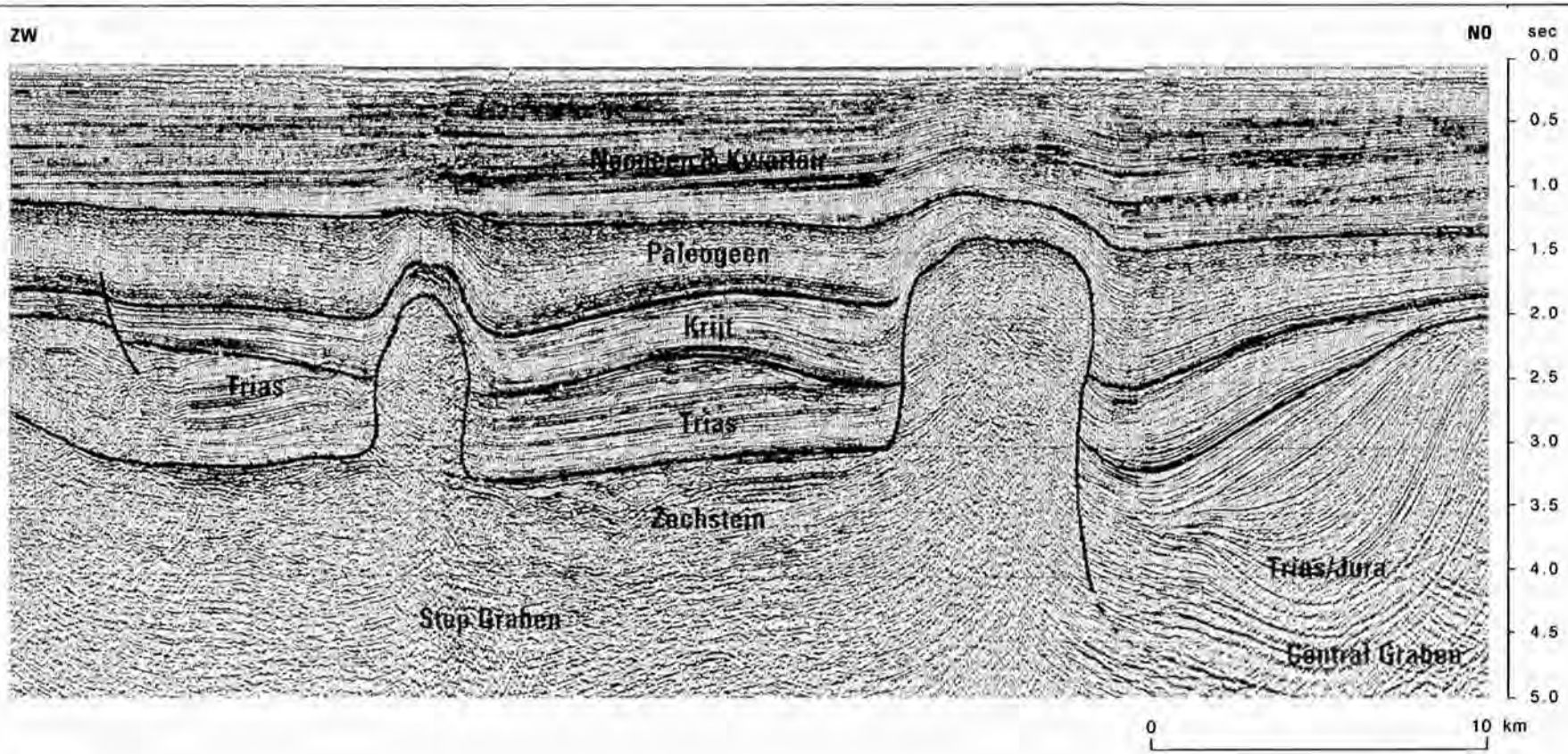
Zoutstructuren zijn vrijwel zonder uitzondering gerelateerd aan een breuk in het substraat (figuur 25). Beweging langs deze breuken resulteert enerzijds in deformatie van het bovenliggende sedimentpakket, waardoor een zwaktezone in het afdekkende sedimentpakket ontstaat die de vorming van een zoutaccumulatie zou kunnen vergemakkelijken. Anderzijds resulteert de breukbeweging in een differentieel spanningsveld binnen het zout door een ongelijke dikte van de sedimentbedekking aan weerszijde van de breuk. De breukbeweging is het 'triggermechanisme' voor de zoutvloei.

Tektonische krachten (intraplaatspanningen) lijken noodzakelijk voor het initialiseren van zoutvloei. Dichtheidsomkering (Rayleigh-Taylor instabiliteit) alleen, veroorzaakt daarvoor waarschijnlijk onvoldoende sterke krachten. Dit blijkt in periodes van relatieve tektonische rust wanneer, ondanks het optreden van een dichtheidsomkering, de zoutvloei stilvalt. De sterkte van het afdekpakket is mogelijk te groot om het zout door gravitatieve kracht alleen te laten stijgen en/of het zout heeft een hoogte bereikt waarop een gravitatieve evenwichtstoestand heerst. Daarnaast speelt waarschijnlijk ook het feit dat de in de lithosfeer opgebouwde intraplaatspanningen zich langs de breukvlakken ontladen hierbij een rol. Deze conclusie is in lijn met de uitkomsten van het onderzoek dat is uitgevoerd door de Vrije Universiteit van Amsterdam in het project GEO-4A.

In het geval van extensie waarbij als gevolg van



Figuur 24
Dieptekaart van de top van de Zechstein Groep met de lokatie van de zoutprovincies. Dit zijn gebieden die op basis van de voorkomende stratigrafische niveaus, hun samenstelling, dikte en diepte alsmede op de vorm, bewegingsgeschiedenis en lokatie van de voorkomende zoutstructuren zijn ingedeeld. Deze provincies komen overeen met de structurele eenheden (figuur 23).



Figuur 25
Seismische lijn (SNST83-10, Nopec/Geco-Prakla) met een voorbeeld van aan breuken gerelateerde zoutstructuren. Beide structuren liggen boven het opgeschoven blok. Het zout is voornamelijk afkomstig van de kant van het afgeschoven blok waar door differentiële belasting de druk het grootste is. Door verstrooiing van het seismische signaal onder het zout is de exacte lokatie van de breuken in het substraat niet aan te geven.

de intraplaatspanningen differentiële daling en dientengevolge differentiële belasting optreedt, is op basis van waarneming geen onderscheid te maken tussen het aandeel van beide krachten. In een compressieve setting is de invloed van intraplaatspanningen op zoutvloei aanwijsbaar. Uit seismische gegevens van de Noordzee blijkt op verschillende lokaties, tijdens fasen van compressieve deformatie, sterke zoutvloei te zijn opgetreden zonder dat er sprake was van een duidelijke differentiële belasting van het steenzout door het afdekpakket. Dit beeld komt geheel overeen met dat van de zoutstructuren in Duitsland (Kockel, 1990, pers comm., 1992; Jaritz, 1987).

De zoutstructuren volgen in geometrische zin het structurele patroon van een gebied; bij interferentie van meerdere structurele trends ontstaat overprinting. Dit is duidelijk te zien aan de oriëntatie van de zoutstructuren in de Noordzee waar de trend in het noorden N-Z gericht is en naar het zuiden wordt overgenomen door een NW-ZO richting (figuur 24). In het overgangsgebied van deze trends worden de zoutwallen door twee elkaar snijdende breukenstelsels beïnvloed waardoor meerdere ronde of ellipsvormige zoutstructuren ontstaan. Deze configuratie doet zich voor in de Central Graben en lijkt goed te kloppen met de ruimtelijke ontwikkeling en geometrie van de zoutstructuren in Noord-Duitsland.

Het blijkt dat de perioden waarin de stijgsnelheden van de zoutstructuren maximaal zijn, corresponderen met het optreden van de tektonische deformatiefasen. Met name gedurende de extensionele Midden- en Laat-Kimmerische fasen (Laat-Jura/Vroeg-Krijt) en de compressieve inversiefasen (Laat-Krijt/Paleogeen) zijn perioden waar dit zich voordoet. In de Central Graben, de Step Graben en het Intermediaire Blok wordt het diapiere stadium tijdens de Laat-Kimmerische fase bereikt. Op de structurele hogen verkeren de zoutstructuren in het kussenstadium. Veelal is uitputting van de moederzoutlaag de reden dat de groei van een zoutstructuur wordt beëindigd.

Op grond van de stratigrafie van de afdekkende sedimenten en haar structurele eigenschappen, alsmede op grond van de daaruit afgeleide geologische geschiedenis, kan worden gesteld dat de ontwikkelingen op de Noordzee grote mate van overeenkomst vertonen met de ontwikkeling in Noordoost-Nederland.

De oudste waargenomen zoutbewegingen stammen uit het Scythien, circa 215 tot 230 miljoen jaar geleden (de zoutpijler Klein-Ulsda). Een groot aantal van de langs de randen van de bekkens gelegen zoutkussens hebben het diapiere stadium tijdens de Laat-Kimmerische tektonische fase I (Laat-Jura) bereikt (SNST83).

De belangrijke conclusie aangaande het OPLA onderzoek is dat de tektonische krachten een belangrijke rol spelen bij het initiëren van zoutbeweging en bij het bepalen van de snelheid waarmee het zout zich verplaatst. Bij eventuele modelstudies dienen tektonische elementen zoals spanningen, spanningsafhankelijk, reologisch gedrag en breukvorming, te worden opgenomen. De tijdschaal waarop deze processen zich afspelen zijn in de orde van miljoenen jaren.

Case study in de M-blokken

Teneinde de zoutbewegingen voor een aantal specifieke zoutstructuren nader te kunnen bestuderen is een case-study gebied in de Noordzee geselecteerd. Criteria hierbij waren dat het gebied representatief moest zijn voor de geologische situatie in Noordoost-Nederland (stratigrafisch en structureel) en de dichtheid van de beschikbare data (seismiek en boringen) moest voldoende zijn. De keuze is gevallen op de blokken M4, M5, M7 en M8 gekozen. Dit gebied vertoont een sterke analogie met de situatie in de provincie Drenthe (de noordgrens van het Nedersaksische Bekken).

Het case-study gebied ligt aan de oostzijde van het Terschelling Bekken waar twee structurele trends elkaar ontmoeten (figuur 23). Het omvat een overgangsgebied tussen een type I en een type II gebied, zoals deze in Noordoost-Nederland eveneens onderscheiden is (RGD-10.568, 1988). De stratigrafische sequentie vertoont een zeer sterke gelijkenis met die in Noordoost-Nederland evenals de structurele ontwikkeling van het gebied. Dit laatste is gezien de grootschaligheid van de structurele gebeurtenissen niet verwonderlijk.

In het case-study gebied komen 5 zoutstructuren voor. Perioden van zoutbeweging waren de Trias, Laat Jura/Vroeg Krijt, Laat Krijt en Eoceen/Oligoceen. De sterkste bewegingen deden zich

voor in relatie tot de Kimmerische deformatiefase (Laat Jura/Vroeg Krijt) en de Pyreneïsche fase (Eoceen/Oligoceen). De zoutbewegingen zijn direct gerelateerd aan breukbewegingen in het substraat. Differentiële belasting heeft ertoe geleid dat uiteindelijk de totale zoutsequentie boven de afgeschoven blokken naar de zoutstructuren is gevloeid, hetgeen het einde van de bewegingen betekende. Voor verschillende perioden zijn de stijgsnelheden van de zoutstructuren berekend (zie paragraaf 2.3.3)

2.3.3 Geologische methoden voor de kwantificering van zoutbewegingen

Inleiding

Het doel van deze studie was de geologische methoden om gemiddelde uitwendige en inwendige stijgsnelheden van zoutstructuren te berekenen nader te onderzoeken, te verbeteren en vervolgens toe te passen. Het belang van deze studie is meerledig: de resultaten zijn van belang voor de veiligheidsstudie PROSA en de resultaten vormen een controle op de uitkomsten van modelstudies (onderdeel C1 van project GEO-1A en het project GEO-4A door de VUA). Het onderzoek vormt een vervolg op de eerder door de RGD uitgevoerde studie naar de invloed van subrosie en halokinese op de stabiliteit van zoutvoorkomens (RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990).

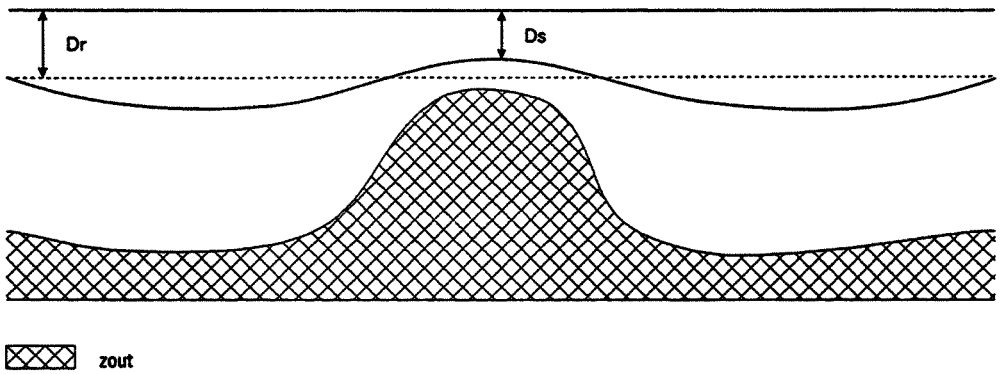
De gemiddelde uitwendige stijgsnelheid

De gemiddelde uitwendige stijgsnelheid is de snelheid waarmee de top van een zoutstructuur stijgt. De berekeningsmethode heeft als uitgangspunt, dat het opstijgende zout een (sedimentaire) verdunning van de afdekkende sedimenten boven de zoutstructuur tot gevolg heeft. Het dikteverschil ten opzichte van de regionale dikte-ontwikkeling representeert de stijging van de structuur. Met behulp van de tijdsduur waarin het verdunde sedimentpakket werd afgezet kan vervolgens de stijgsnelheid worden berekend. Deze methode is o.a. toegepast door Hospers and Holte (1984), Sørensen (1986), in RGD-30.010E (1989) en Petersen (1991). Figuur 26 laat schematisch de werking van deze methode zien.

Problematisch bij toepassing van de berekeningsmethode voor gemiddelde uitwendige stijgsnelheden zijn de veel voorkomende inzakstructuren boven zoutstructuren als gevolg van rekspanningen en/of subrosie. Deze inzakstructuren worden door groeibreuken begrensd, waarbij vrijwel elk stratigrafisch interval dikker ontwikkeld is binnen de inzakstructuur dan in de onmiddellijke omgeving ervan. Aan de voorwaarde dat verdunning van sedimenten boven een zoutstructuur een gevolg is van het opstijgende zout wordt in die gevallen niet meer voldaan. Het is daarom niet gerechtvaardigd om berekeningen van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid uit te voeren voor dergelijke zoutstructuren met inzakkingsverschijnselen.

De gemiddelde inwendige stijgsnelheid

De gemiddelde inwendige stijgsnelheid is de snelheid waarmee het zout zich binnen een zoutstructuur verplaatst. De gemiddelde



Figuur 26
Schematische weergave van de berekeningsmethode voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid. Dr is de regionale dikte van de eenheid die afgezet werd gedurende de periode waarvoor de stijgsnelheid wordt berekend (de regionale dikte is de dikte van de beschouwde stratigrafische eenheid als er geen zouttektoniek opgetreden was), Ds is de dikte van dezelfde stratigrafische eenheid boven de zoutstructuur. Het verschil tussen deze diktes is veroorzaakt door de opwaartse beweging van het zout.

inwendige stijgsnelheid wordt bepaald aan de hand van het volume steenzout dat per tijdseenheid een arbitrair gekozen horizontale dwarsdoorsnede van de zoutstructuur passeert. Uitgangspunt van berekeningen van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid is dat de in de zoutstructuur geaccumuleerde hoeveelheid zout evenredig is met het overschot aan sedimenten in de randsynclines (c.q. depletiegebieden). De uitkomsten van de berekeningen kunnen niet gebruikt worden voor uitspraken over stijgsnelheden op een bepaald moment of een bepaalde lokatie binnen één zoutstructuur (figuur 27).

Compactiecorrecties

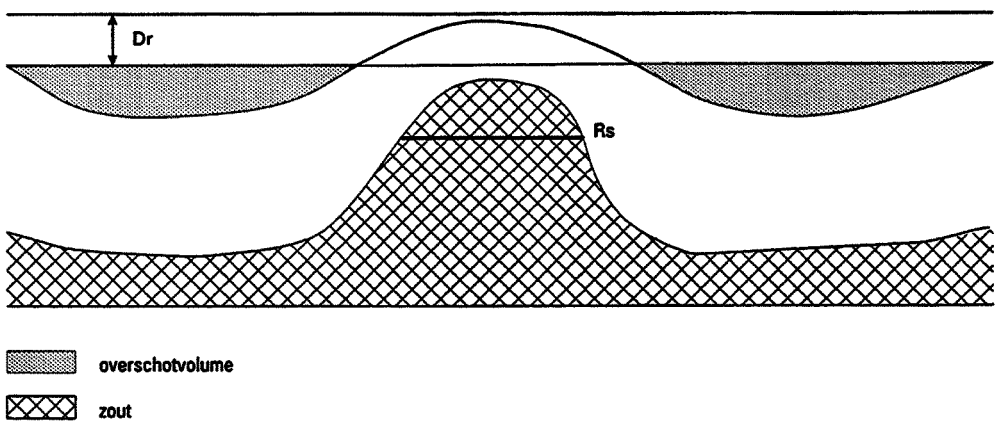
Bij het uitvoeren van bovenbeschreven berekeningen dienen volumes en dikten vergeleken te worden op basis van hun oorspronkelijke waarden direct na afzetting. Dit betekent dat huidige dikten en volumes gecorrigeerd dienen te worden voor compactie (Sørensen, 1986). Een belangrijk aandachtspunt in het onderzoek vormde het verbeteren van de methodiek voor deze compactiecorrecties. Dit heeft erin geresulteerd dat de syn-compactiecorrectie die in eerder onderzoek (RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990) abusievelijk deel uitmaakte van de methode, is verwijderd omdat theoretisch bewezen is dat deze factor gelijk is aan nul. De compactiecorrecties die in de huidige berekeningen worden toegepast, betreffen de post-compactiecorrectie en de pre-compactiecorrectie en worden per stratigrafisch interval berekend.

De post-compactiecorrectie corrigeert voor de compactie veroorzaakt in het betreffende stratigrafische interval door het gewicht van latere afzettingen. De pre-compactiecorrectie corrigeert voor de compactie in de onderliggende sedimenten veroorzaakt door de afzetting van het betreffende stratigrafische interval.

Een laatste verbetering bij de toepassing van de aangepaste methode is dat de pre-compactiecorrectie in tegenstelling tot in eerder onderzoek (RGD-30.010, 1989) nu ook voor de Mesozoïsche gesteenten is uitgevoerd.

Resultaten

De gemiddelde inwendige stijgsnelheid is berekend voor enkele zoutpijlers in Noordoost-Nederland en in de M-blokken op de Noordzee. Op het vasteland is voor drie geologische perioden de gemiddelde inwendige stijgsnelheid bepaald. De algemene trend is dat gedurende het Vroeg- en Midden-Oligoceen (circa 35-29 miljoen jaar geleden) verhoogde stijgsnelheden optraden, met een maximum van gemiddeld 0,12 mm/j voor Pieterburen. Deze uitkomsten zijn circa 3-5 keer hoger dan de gemiddelde inwendige stijgsnelheid voor het Laat-Tertiair/Kwartair (circa 20 tot 0 miljoen jaar geleden). Voor de M-blokken is noodgedwongen een andere tijdsindeling gemaakt. De stijgsnelheden gedurende het Laat-Krijt varieerden tussen 0,011 en 0,030 mm/j voor de doorsnede op de halve hoogte van de



Figuur 27
Schematische weergave van de berekeningsmethode voor de gemiddelde inwendige stijgsnelheid. Dr is de regionale dikte van de eenheid die werd afgezet tijdens de periode waarvoor de stijgsnelheid berekend wordt, Rs is de doorsnede van de zoutstructuur. Het overschotvolume is met een grijstint aangegeven. Het overschotvolume is het extra volume dat is afgezet in de door zoutdepletie ontstane ruimte. Dit volume komt overeen met de hoeveelheid zout die naar de zout structuur is verplaatst. De gemiddelde inwendige stijgsnelheid wordt bepaald door de hoeveelheid zout die per tijdseenheid een bepaalde doorsnede van de zoutstructuur (Rs) passeert.

structuur en tussen de 0,023 en 0,063 mm/j voor de doorsnede op driekwart van de hoogte. Gedurende het Tertiair waren de snelheden geringer. Zij varieerden tussen de 0,006 en 0,020 mm/j voor het minimale geval (doorsnede op halve hoogte) en tussen 0,013 en 0,040 voor het maximale geval (doorsnede op 3/4 hoogte).

De berekende waarden voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van een aantal zoutstructuren in Noord-Nederland en in de M-blokken op de Noordzee lopen uiteen tussen -0,04 en 0,06 mm/j. Voor de zoutpijler Schoonlo is een gemiddelde uitwendige stijgsnelheid bepaald van maximaal 0,11 mm/j (vgl. 0,28 mm/j in het rapport 'Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar' (RGD-30.010, 1990). Dit zou betekenen dat Schoonlo aanzienlijk sneller stijgt dan andere zoutstructuren. Men moet echter rekening houden met het verhoudingsgewijs zeer korte tijdsinterval waarover gerekend wordt, waardoor kleine verschillen in de diktebepalingen grote variaties in stijgsnelheden veroorzaken. Diktebepalingen van het afdekkende sedimentpakket in RGD-30.010 geeft een variatie van 10 m voor zowel de regionale dikte als voor de dikte boven de zoutstructuur, wat kan leiden tot onzekerheden van enige honderdsten millimeters per jaar in de berekende stijgsnelheid.

Het achterwege laten van compactiecorrecties bij volumeberekeningen leidt, afhankelijk van het gekozen stratigrafische interval, tot fouten die kunnen oplopen tot tweemaal de berekende waarde met compactiecorrecties (corresponderend met een volumeverlaging van 20-40% voor het Oligoceen en zelfs 30 tot 50% voor het Laat-Tertiair/Kwartair). Deze volumeverlaging is veel groter dan de door Zirngast (1991) geschatte afwijking van 10%. De huidige methodiek heeft geleid tot een nauwkeuriger berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid; deze is enige tientallen procenten tot een factor 2,5 lager dan de berekende waarden in Fase 1 van het OPLA Programma (RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990).

De uitkomsten van de berekeningen van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid en van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid zijn van dezelfde orde van grootte, met maxima van 0,11 mm/j voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid en 0,12 mm/j voor de gemiddelde inwendige stijgsnelheid. Dit is tevens dezelfde orde van grootte als vermeld in vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd naar structuren in het Perm Bekken (Hospers & Holte 1984; RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990; Petersen, 1991; Zirngast, 1991).

Gerealiseerd dient te worden dat de feitelijk opgetreden stijgsnelheid van zoutstructuren individueel gedurende kortere perioden dan de beschouwde tijdspanne kan hebben afgeweken van de berekende. De berekende stijgsnelheden zijn gegeven ten opzichte van de steenzoutmoederlaag.

2.3.4 Modellering van zoutbeweging

Dit projectonderdeel heeft twee doelstellingen:
1. Het geven van een overzicht van de verschillende modelleertechnieken toegepast op zoutbeweging.
2. Het bepalen van de meest geschikte modelleertechnieken voor het simuleren van de Nederlandse situatie en het vaststellen welke processen en parameters in zo'n model een rol spelen.

Het modelleren van zoutbewegingen is te verdelen in drie categorieën: experimentele, analytische en numerieke modellen. Bijna alle huidige modellen beschrijven zoutbewegingen op basis van een, door dichtheidsomkering ontstane, opwaartse kracht. Slechts enkele experimentele en numerieke modellen simuleren ook tektonische krachten. Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat in alle huidige modellen van zoutbeweging de modelresultaten in overeenstemming gebracht zijn met de geologische gegevens door middel van een vrij gekozen viscositeit van het bovenliggende sediment. Met de huidige modellen kunnen derhalve nog geen betrouwbare voorspellingen gedaan worden.

Experimentele modellen bestaan uit geschaalde analogen van werkelijke situaties. Sedimenten en zout zijn vervangen door vloeistoffen. Meestal bestaan deze experimentele modellen uit een gesloten container met daarin een laag olie met een hoog soortelijk gewicht (het sediment) met daarop een laag olie met een laag soortelijk gewicht (het zout). Door de container om te draaien ontstaat een instabiel evenwicht van een zwaardere vloeistof die een lichtere bedekt: de Rayleigh-Taylor instabiliteit (o.a. Nettleton, 1934;

Whitehead & Luther, 1975; Talbot et al., 1991; Rönnlund & Koyi, 1991). Hierbij worden met name de invloed van de viscositeiten (en het contrast) en dichtheden op de vorm, de onderlinge afstand en de groeisnelheid bestudeerd. Wanneer een model met behulp van een centrifuge aan kunstmatig verhoogde zwaartekrachten wordt blootgesteld kunnen stijve materialen zoals siliconen putty, klei of zand worden gebruikt (o.a. Ramberg, 1963; Dixon, 1974; Koyi, 1991; Koyi & Peterson, 1992; Jackson & Talbot, 1989; Jackson et al., 1990;). Op deze manier kunnen redelijk gecompliceerde driedimensionale modellen worden getest waarbij tevens extensionele of compressieve tektonische krachten kunnen worden gesimuleerd (o.a. Koyi, 1991). Door de stijfheid van het materiaal kan het deformatieproces tussentijds gestopt worden zodat dit stapsgewijs gevolgd kan worden. Belangrijk nadelen van deze techniek zijn dat zij zeer bewerkelijk is en dat zij geen kwantitatieve resultaten oplevert.

Analytische modellen zijn mathematische beschrijvingen van de Rayleigh-Taylor instabiliteit. Zowel het sediment als het zout worden beschreven als een Newtoniaanse vloeistof. Deze zogenaamde lineaire stabiliteitsanalyse berekent de groeisnelheid en de onderlinge afstand van diapieren (Selig, 1965; Biot & Odé, 1965; Ramberg, 1968a, b; Turcotte & Schubert, 1982). De voorwaarde dat het beschreven proces lineair moet zijn maakt deze modellen echter alleen geschikt voor het allereerste stadium in de ontwikkeling van zoutstructuren (Woidt, 1978). Dit maakt deze analysen ongeschikt voor het OPLA onderzoek. Wel kunnen zij dienen als controle van de software van numerieke modellen.

De numerieke modellen tenslotte, beschrijven de gehele ontwikkeling van een enkele of een groep van zoutstructuren. Hierbij worden verschillende processen gesimuleerd: sedimentatie, erosie en compactie (o.a. Poliakov & Podlachikov, 1992; Römer & Neugebauer, 1992; Van Keken et al., 1992; Poliakov et al., 1992), intraplaatspanningen (VUA, 1992a, b), differentiële belasting (Römer & Neugebauer, 1992), topografie-effecten (Poliakov & Podlachikov, 1992) en non-Newtoniaans gedrag van het zout en/of het sediment (Römer & Neugebauer, 1992; Tsai et al. 1987; Van Keken et al., 1992; VUA, 1992a, b). Het diapirismemodel dat in het kader van het OPLA Programma aan de VUA is ontwikkeld is het eerste model waar de viscositeit van het sediment spanning- en diepte-afhankelijk is (VUA, 1992a, b). Onder meer kan bros gedrag (breukvorming) onder invloed van laterale extensie en compressie optreden. Als deze beschrijving voldoende getest is zal het een belangrijke verbetering van de numerieke zoutmodellen zijn.

Van de diverse onderzochte modellen zijn de numerieke modellen het meest realistisch. Het voordeel van numerieke modellen is dat parameters als druk, temperatuur en spanning altijd en overal in het model bepaald kunnen worden. De numerieke nauwkeurigheid van de modellen is groot. De bruikbaarheid van de huidige numerieke modellen voor de zoutstructuren in Nederland wordt met name beperkt doordat de beschrijving van de vervormingsmechanismen van het sedimentpakket niet ideaal is (waardoor vrijwel alle modellen diapieren met onrealistisch grote overhangen geven), en er geen breukvorming in het substraat gemodelleerd wordt. Voor de ontwikkeling van een numeriek model voor zoutbewegingen betreffende Nederland is gezien de aard van het probleem en de benodigde flexibiliteit en accuratesse, een Lagrangiaanse beschrijving van een eindige-elementen model het meest geschikt.

Het model zal uitvoerig geverifieerd dienen te worden door vergelijking van de modelresultaten met de geologische situatie in de Nederlandse ondergrond. In later stadium zal het model dan geïntegreerd kunnen worden met een barrière model.

2.3.5 Conclusies en aanbevelingen

Bewegingsgeschiedenis van zoutstructuren

1. Het blijkt dat op het Nederlands deel van het Continentaal Plat wat betreft de zoutstructuren, de stratigrafie van de afdekkende sedimenten, de structurele omstandigheden en de ontwikkelingsgeschiedenis, goede equivalenten aanwezig zijn van het studiegebied in Noordoost-Nederland. Dit betekent dat de uitspraken omtrent de ontwikkelingsgeschiedenis van de structuren op het Continentaal Plat (zie hieronder) kunnen worden geëxtrapoleerd naar het studiegebied.
2. Er bestaat een duidelijke relatie tussen het optreden van deformatiefasen in de geologische geschiedenis en verhoogde intensiteit van zoutbeweging. Dit betreft de extensionele

Midden- en Laat-Kimmerische fasen I en II (Laat-Jura & Vroeg-Krijt), de compressieve inversiefasen (Laat-Krijt & Vroeg-Paleogeen) en de Pyreneïsche fase (Eoceen & Oligoceen). De versnelling van de zoutvloei lijkt evenredig met de tektonische activiteit. De oudste waargenomen zoutbewegingen stammen uit het Scythien (ongeveer 230 tot 215 miljoen jaar geleden). Een groot aantal van de langs de randen van de bekkens gelegen zoutkussens hebben het diapiere stadium tijdens de Laat-Kimmerische tektonische fase I (Laat-Jura) bereikt.
3. Zoutstructuren zijn vrijwel zonder uitzondering gerelateerd aan een breuk in het substraat (SNST83). Beweging langs deze breuken resulteert enerzijds in deformatie van het bovenliggende sedimentpakket, waardoor een zwaktezone in het bovenliggende gesteente ontstaat. Anderzijds resulteert de breukbeweging in een differentieel spanningsveld binnen het zout door een ongelijke dikte van de sedimentbedekking. De breukbeweging is het 'triggermechanisme' voor de zoutvloei. Naarmate het verzet langs de breuk groter is, is de zoutstructuur beter ontwikkeld. Uit de kaartbeelden blijkt, dat interferentie van breukenstelsels in het substraat weerspiegeld wordt in de geometrie van de zoutstructuren. Dit varieert van langgerekte zoutwallen parallel aan één sterk dominant ontwikkelde breuktrend, tot in kleinere segmenten opgebroken zoutwallen, wanneer twee breukenstelsels interfereren. Deze segmenten hebben hun langste as in de richting van de dominante breuktrend en lijnen op langs die richting.
4. Grootschalige tektonische krachten (intraplaatspanningen) lijken noodzakelijk voor het initialiseren van zoutvloei. Dichtheidsomkering (Rayleigh-Taylor instabiliteit) alleen veroorzaakt daarvoor waarschijnlijk onvoldoende sterke krachten. Dit blijkt in periodes van relatieve tektonische rust wanneer ondanks het optreden van een dichtheidsom-kering de zoutvloei stil valt. Differentile belasting door het afdekpakket veroorzaakt eveneens een kracht die van invloed is op de mate en snelheid van zoutvloei. In het geval van extensie waarbij als gevolg van de intraplaatspanningen differentiële daling en dientengevolge differentiële belasting optreedt, is op basis van waarneming geen onderscheid te maken tussen het aandeel van beide krachten. In een compressieve setting is de invloed van intraplaatspanningen op zoutvloei aanwijsbaar. Uit seismische gegevens van de Noordzee blijkt op verschillende lokaties, tijdens fasen van compressieve deformatie, sterke zoutvloei te zijn opgetreden zonder dat er sprake was van een duidelijke differentiële belasting van het steenzout door het afdekpakket.
5. Een belangrijke reden waarom zoutbewegingen ophouden is het uitputten (bijvoorbeeld in G13 en M7) van de moederlaag, de Zechstein Groep.
6. Toepassing van een geometrische reconstructiemethode voor diepteprofielen heeft de mogelijkheid geboden om voor verschillende tijdstippen de structurele ontwikkeling van zoutvoorkomens te bepalen. Zodoende is een inzicht verkregen in de complexe interactie tussen sedimentatie en deformatie. De geautomatiseerde verwerking maakt het mogelijk dit op efficiënte wijze uit te voeren.

Methode voor berekening van stijgsnelheden

7. Bij de berekening van stijgsnelheden is het van groot belang compactiecorrecties uit te voeren. In het huidige onderzoek zijn twee belangrijke verbeteringen aangebracht in de gehanteerde methodiek. Allereerst is de theoretisch onjuiste syn-correctie achterwege gelaten en ten tweede is de pre-compactiecorrectie ook voor de Mesozoïsche gesteenten uitgevoerd. Het achterwege laten van compactiecorrecties bij volumeberekeningen leidt, afhankelijk van het gekozen stratigrafische interval, tot fouten die kunnen oplopen tot tweemaal de berekende waarde met compactiecorrecties. De huidige methodiek heeft geleid tot een nauwkeuriger berekening van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid. De hier berekende stijgsnelheden zijn enige tientallen procenten tot een factor 2,5 lager dan de berekende waarden in Fase 1 van het OPLA Programma (RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990).
8. De gemiddelde inwendige stijgsnelheid is berekend voor enkele zoutpijlers in Noordoost-Nederland en in de M-blokken op de Noordzee. Op het vasteland is voor drie geologische perioden de gemiddelde inwendige stijgsnelheid bepaald. De algemene trend is dat gedurende het Vroeg- en Midden-Oligoceen (circa 35-29 miljoen jaar geleden) verhoogde stijgsnelheden optraden, met een maximum van gemiddeld 0,12 mm/j voor Pieterburen. Deze uitkomsten zijn ongeveer 3 tot 5 keer hoger dan de gemiddelde inwendige stijgsnelheid voor het Laat-Tertiair en Kwartair (circa 20 tot 0 miljoen jaar geleden). Voor de M-

blokken is noodgedwongen een andere tijdsindeling gemaakt. De stijgsnelheden gedurende het Boven-Krijt varieerden tussen 0,011 en 0,030 mm/j voor de doorsnede op de halve hoogte van de structuur en tussen 0,023 en 0,063 mm/j voor de doorsnede op driekwart van de hoogte. Gedurende het Tertiair waren de snelheden geringer. Zij variëren tussen de 0,006 en 0,020 mm/j voor het minimale geval en tussen de 0,013 en 0,040 voor het maximale geval.

9. De berekende waarden voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid van een aantal zoutstructuren in Noord-Nederland en in de M-blokken op de Noordzee loopt uiteen tussen -0,04 en 0,06 mm/j. Voor de zoutpijler Schoonlo is een gemiddelde uitwendige stijgsnelheid bepaald van maximaal 0,11 mm/j (vgl. 0,28 mm/j in het rapport 'Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar' (RGD-30.010, 1990). Dit zou betekenen dat Schoonlo aanzienlijk sneller stijgt dan andere zoutstructuren. Men moet echter rekening houden met het zeer korte tijdsinterval waarover gerekend wordt, waardoor kleine verschillen in de diktebepalingen grote variaties in stijgsnelheden veroorzaken. Diktebepalingen van het afdekkende sedimentpakket in RGD-30.010 geeft een variatie van 10 m voor zowel de regionale dikte als voor de dikte boven de zoutstructuur.

10. De uitkomsten van de berekeningen van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid en van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid zijn van de zelfde orde van grootte, met maxima van 0,11 mm/j voor de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid en 0,12 mm/j voor de gemiddelde inwendige stijgsnelheid. Dit is tevens dezelfde orde van grootte als vermeld in vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd naar structuren in het Perm Bekken (Hospers & Holte 1984; RGD-30.010E, 1989; RGD-30.010, 1990; Petersen 1991; Zirngast, 1991).

11. Inzakstructuren boven zoutstructuren a.g.v. rekspanningen en/of subrosie staan berekeningen van de gemiddelde uitwendige stijgsnelheid niet toe.

12. De uitkomsten van de gemiddelde inwendige stijgsnelheid kunnen niet gebruikt worden voor uitspraken over stijgsnelheden op een bepaald moment of op een bepaalde lokatie binnen één zoutstructuur.

13. De feitelijk opgetreden stijgsnelheid kan per individuele zoutstructuur gedurende kortere geologische perioden dan de beschouwde hebben afgeweken van de berekende waarden.

Modellering van zoutbeweging

14. In alle huidige modellen van zoutbeweging (lineaire stabiliteitsanalyse, analytische, schaal en numerieke modellen) zijn de modelresultaten in overeenstemming gebracht met de geologische gegevens door middel van een vrij gekozen viscositeit van het bovenliggende sediment. Met de huidige modellen kunnen derhalve nog geen betrouwbare voorspellingen gedaan worden.

15. De numerieke modellen zijn het meest realistisch. Het voordeel is dat parameters als druk, temperatuur en spanning altijd en overal in het model bepaald kunnen worden. Recente numerieke modellen bevatten sedimentatie, erosie, topografie-effecten, diepte-afhankelijke dichtheid, een goede beschrijving van de viscositeit van het zout en een spanning- en diepte-afhankelijke viscositeit van het sediment. De numerieke nauwkeurigheid van de modellen is groot.

16. De bruikbaarheid van de huidige numerieke modellen voor de zoutstructuren in Nederland wordt met name beperkt doordat de beschrijving van het reologisch gedrag en de vervormingsmechanismen van met name het sedimentpakket niet ideaal zijn (waardoor vrijwel alle modellen diapieren met onrealistisch grote overhangen geven), en er geen breukvorming in het substraat gemodelleerd wordt. Voor vele andere processen (zoals sedimentatie en erosie) bestaan reeds in de literatuur gepubliceerde modellen welke uiteindelijk in het nederlandse model geïmplementeerd zouden moeten worden.

17. Het diapirismemodel dat in het kader van het OPLA Programma in samenwerking met de RGD aan de VUA is ontwikkeld, is het eerste model waar de viscositeit van het sediment spanning- en diepte-afhankelijk is. Onder meer kan bros gedrag (breukvorming) onder invloed van laterale extensie en compressie in het model worden meegenomen. Als deze beschrijving voldoende getest is zal het een belangrijke verbetering van de numerieke zoutmodellen zijn.

18. Voor de ontwikkeling van een numeriek model voor zoutbewegingen betreffende Nederland is gezien de aard van het probleem en de benodigde flexibiliteit en accuratesse, een Lagrangiaanse beschrijving van een eindige-elementen model het meest geschikt.

Aanbevelingen

1. De reconstructie van de bewegingsgeschiedenis van zoutstructuren en de kwantificering van de stijgsnelheden dienen van een meer gedetailleerd tijdframe te worden voorzien om kortstondige fluctuaties in de beweging van het zout op te kunnen sporen (tijdstap tussen 0,1 en 1 miljoen jaar). Dit is mogelijk als hoge-resolutie seismiek (2D/3D) kan worden gekoppeld aan een geologisch tijdkader dat met behulp van hoge-resolutie stratigrafische methoden uit boringen wordt afgeleid. Geavanceerde backstrip methoden kunnen vervolgens worden ingezet om de bewegingsgeschiedenis te ontrafelen en te kwantificeren.
2. Onzekerheden omtrent invloed en afhankelijkheid van intraplaatspanning, differentiële belasting en sterkte van het afdekpakket zoals genoemd in conclusie 4 betreffende de bewegingsgeschiedenis van zoutstructuren, zou met behulp van numerieke modellen nader onderzocht dienen te worden. Hierbij wordt met name gedacht aan het gebruik van het model voor zoutbeweging dat door de Vrije Universiteit Amsterdam in samenwerking met de RGD binnen de projecten GEO-4A en GEO-1A is ontwikkeld.
3. Teneinde uitspraken te kunnen doen omtrent de lokale interne stijgsnelheden op een bepaald moment dient de interne opbouw van de Nederlandse zoutstructuren onderzocht te worden.
4. Om tot een operationeel fysisch-mathematisch model, waarmee toekomstige zoutbeweging van de Nederlandse zoutstructuren voorspeld kan worden, te komen zal vervolgonderzoek zich eerst moeten richten op het ontwikkelen van een numeriek model dat de huidige situatie kan beschrijven. Speciale aandacht dient uit te gaan naar:
- Breukbeweging in het substraat.
- Een goede beschrijving van de vervormingsmechanismen van het zout en het sediment.

Het beschrijven van de koppeling van breukbeweging in het substraat, sedimentatie en erosie met grootschalige tektonische processen is moeilijk en tijdrovend. Breukbeweging in het substraat, sedimentatie en erosie zouden daarom beter direct gebaseerd kunnen worden op realistische waarden afgeleid van de beschikbare geologische gegevens van de Nederlandse ondergrond om zodoende het model te kunnen verifiëren.

Referenties

Athy, F. (1930). Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. AAPG Bull., vol. 14, p. 1-24.

Baldwin, B. & C.O. Butler (1985). Compaction curves. AAPG Bull., vol. 69, no. 8, p. 622-626.

Biot, M.A. & H. Odé (1965). Theory of gravity instability with variable overburden and compaction. Geophysics, vol. 30. no.2, p. 213-227.

Bond, G.C. & M.A. Kominz (1984). Construction of tectonicsubsidence curves for the lower Paleozoic miogeocline, southern Canadian Rocky Mountains: implications for subsidence mechanisms, age of breakup and crustal thinning. Bull. geol. Soc. Am., vol. 95, p. 155-173.

Daly, P.J. (1967). Numerical study of two fluid Rayleigh-Taylor instability, Phys. Fluid, 10, p. 297-307.

DG8601 (1986). Regionale seismische lijn, Delft Geophysical.

Dixon, J.M. (1974). A new method for determination of finite strain in models of geological structures. Tectonophysics, vol. 24, p. 99-114.

Heybroek, P. (1975). On the structure of the Dutch part of the Central North Sea Graben. In: Woodland, A.W. (red.). Petroleum and Continental Shelf of NW Europe. Appl. Science Publishers Ltd. Barking, Essex, p. 339-351.

Hospers, J. & J. Holte (1984). Growth of salt-induced structures in the Norwegian-Danish Basin. Tectonophysics, vol. 107, p. 81-104.

Jackson, M.P.A. & C.J. Talbot (1989). Anatomy of mushroom shaped diapirs. J. Struct. Geol., 11, p. 211-230.

Jackson, M.P.A., R.R. Cornelius, C.H. Craig, A. Gannser, J. Stöcklin & C.J. Talbot (1990). Salt Diapirs of the Great Kavir, Central Iran. Geological Society of America, memoir 177, 137 p.

Jaritz, W. (1987). The origin and development of salt structures in north-west Germany. In: I. Lerche & J.J. O'Brien (red.). Dynamical Geology of Salt and Related structures. Academic Press Orlando, p. 480-493.

Kockel, F. (1990). Proceedings of symposium on DIAPIRIRSM with special reference to Iran, vol. 2, Geological survey of Iran.

Koyi, H. (1991). Gravity overturnes, extension and basement fault activation. Journal of Petroleum Geology, vol. 14 (2), p. 117-142.

Koyi, H. & K. Petersen (1992). The influence of basementfaults on the development of salt structures in the dannish Basin. Marine and Petrol. Geol.

Nettleton, L.L. (1934). Fluid mechanics of salt domes, AAPG Bull., vol.18, p. 1175-1204.

Petersen, K. (1991). The effect of gravitational compactionon estimation of vertical salt structure growth. Tectonophysics, vol. 194, p. 35-48.

Poliakov, A. & Y. Podladchikov (1992a). Diapirism and topography, Geophys. J. Int., vol. 109, p. 553-564.

Poliakov, A., R. van Balen, Y. Podladchikov, B. Daudre, S. Cloetingh & C. Talbot (1992). Erosion and diapirism : A comparative analysis of salt diapirism for different cases of erosion. In: VUA (1992b).

Ramberg, H. (1963). Experimental studies of gravity tectonics by means of centrifuged models, Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, vol. 42. p. 1-97.

Ramberg, H. (1968 a, b). Instability of layered systems in the field of gravity, I and II. Physics Earth and Planetary Interiors 1. p. 427-474.

Remmelts G. & E.J.TH. Duin (1990). Results of a regional deep seismic survey in The Netherlands. In: B. Pinet & C. Bois (red.). The potential of Deep Seismic Profiling for Hydrocarbon Exploration. Edition Technip, Paris. p. 335-343.

Rijks Geologische Dienst (1988). Aut.: M.C. Geluk & A.F.B. Wildenborg, Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland. Rapportno. 10.568.

Rijks Geologische Dienst (1989). Aut.: A.F.B. Wildenborg & K. Van Gijssel, Verfijning geologische berekenings-methoden voor gemiddelde stijgsnelheden en hun toepassing op Nederlandse zoutstructuren. Rapportno. 30.010E, project Vervolg GEO-1.

Rijks Geologische Dienst (1990). Aut.: A.F.B. Wildenborg & K. Van Gijssel, Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar. Rapportno. 30.010.

Rijks Geologische Dienst (1990). Toelichting bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Assen West (12W) en Assen Oost (12O), Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (1991a). Geological Atlas of the subsurface of The Netherlands, Explanation to map sheet I Vlieland-Terschelling, Geological Survey of The Netherlands, Haarlem

Rijks Geologische Dienst (1991b). Geological Atlas of the subsurface of The Netherlands, Explanation to map sheet II Ameland-Leeuwarden, Geological Survey of The Netherlands, Haarlem

Rijks Geologische Dienst & Dienst Grondwaterverkenning-TNO (1985). Aut.: H. Speelman & J.N. Breunesse, Permeabiliteit, porositeit en kleigehalte van Tertiaire en Onder-Kwartaire afzettingen in Nederland. Rapprtno. 10.371.

Rühberg, N. (1976). Probleme der Zechsteinsalzbewegung. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 22, Heft 9, p. 413-420.

Römer, M-M & H.J. Neugebauer (1991). The salt dome problem : a multilayered approach, J. Geoph. Res. 96, no. b2, p. 2389-2396.

Rönnlund, P. & H. Koyi (1988). Fry Spacing of deformed and undeformed modeled and natural salt domes. Geology, vol. 16, p. 465-468.

Sclater, J.G. & Christie (1980). Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. J. Geophys. Res., vol. 85, no. B7, p. 3711-3739.

Schulz-Ela, D. & K. Duncan (1991). "Restore" users manual and software: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Austin, TX, 75 p.

Selig, F. (1965). A theoretical prediction of saltdome patterns. Geophysics, vol. 30, p. 633-643.

Seni, S.J. & M.P.A. Jackson (1983a). Evolution of salt structures, East Texas diapir province, part 1: sedimentary record of halokinesis. AAPG Bull., vol. 67, no. 8, p. 1219-1244.

Seni, S.J. & M.P.A. Jackson (1983b). Evolution of salt structures, East Texas diapir province, part 2: patterns and rates of halokinesis. AAPG Bull., vol. 67, no. 8, p. 1245-1274.

Sørensen, K. (1986). Rim syncline volume estimation and salt diapirism. Nature, vol. 319, p. 23-27.

Talbot, C.J., P. Rönnlund, H. Schmeling, H. Koyi & M.P.A. Jackson (1991). Diapiric spoke patterns. Tectonophysics, vol. 188, p. 187-201.

Tsai, F.C., J.E.O. O'Rourke & W. Silva (1987). Basement rock faulting as a primary mechanism for initiating major salt deformation features, 28th US Symposium on Rock Mechanics.

Turcotte, D.L. & G. Schubert (1982). Geodynamics: applications of continuum physics to geological problems. John Wiley, New York, 450 p.
Keken, P.E. Van, C.J. Spiers, A.P. van den Berg, E.J. Muyzert (1992). The effective viscosity of rocksalt: impletation of steady state creep laws in numerical models of salt diapirsm, submitted to Tectonophysics.
Vrije Universiteit van Amsterdam (1992a). Intraplaattektoniek, bekkenmodellering en zoutdiapirisme, Implementatietechnieken; rapportage OPLA project februari 1992, OPLA92-56. Sectie Structurele Geologie/ Tektoniek VUA.
Vrije Universiteit van Amsterdam (1992b). Intraplaattektoniek, bekkenmodellering en zoutdiapirisme, Inhoudelijke deelstudie: Modellering Deel 1 en 2; rapportage OPLA project augustus 1992. Sectie Structurele Geologie/Tektoniek VUA.
Weinberg, R.B. & H. Schmeling (1992). Polydiapirs: multiwavelength gravity structures, J. Struct. Geol., vol. 14, no. 4, p. 425-436.
Whitehead, J.A., jr. & D.S. Luther (1975). Dynamics of laboratory diapir and plume models. Journal of Geophysical Reasearch, vol. 50, p. 369-368.
Woidt, W.D. (1978). Finite element calculations applied to salt dome analysis, Tectonophysics, vol. 50, p. 369-386.
Zaleski, S. & P. Julien (1992). Numerical simulation of Rayleigh-Taylor instability for single and multiple salt diapirs, Tectonophysics, vol. 206, p. 55-69.
Ziegler, P.A. (1990). Geological Atlas of Western and Central Europe 1990. Shell Int. Petr. Mij., 239 p.
Zirngast, M. (1991). Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung Geologisches Jahrbuch, Reihe A, p. 3-31.

2.4 Caprock-vorming en het modelleren van subrosie

2.4.1 Opbouw en ontstaan van caprock op basis van boorkernanalyse

Inleiding

In de boring Zuidwending-9 is 6 meter van het onderste deel van de caprock gekernd en werd voor het onderzoek in het project GEO-1A uniek kernmateriaal beschikbaar gesteld (figuur 28). Aan deze kern zijn gedetailleerd petrografische, geochemische en isotoopanalyses gemaakt. Ook werden magnetostratigrafische metingen uitgevoerd. Doel van het onderzoek was het ontstaan van deze caprock te evalueren in relatie tot diagenetische en subrosieprocessen.

Een zoutpijler is opgebouwd uit een zoutlichaam, veelal afgedekt door een gesteentekap voornamelijk bestaande uit oplossingsresiduën. Deze kap wordt "caprock" genoemd. Subrosie, gedefinieerd als het oplossen van zouten en de dispersie hiervan in stromend grondwater, vindt voornamelijk plaats aan de top van de zoutstructuur (o.a. Kyle & Price, 1986; Posey & Kyle, 1988). Bij dit proces groeit de caprock aan de onderkant aan (Batsche & Klarr, 1980). Hierbij is met name de overgangszone tussen steenzout en caprock, zoutspiegel genoemd, van belang. Op deze zoutspiegel komen grote laterale verschillen voor in het soort contact tussen de caprock en het steenzout. Zowel ondoorlatende als doorlatende zones kunnen in de caprock naast elkaar optreden.

De zoutpijler Zuidwending, gelegen in de provincie Groningen, is vermoedelijk de meest ondiepe zoutstructuur in Nederland (zie ook figuur 2). De top van de structuur ligt op een diepte van 110 tot 120 m onder NAP. Het centrale deel van de zoutpijler is opgebouwd uit Zechstein 2 Zout. Het betreft de geologisch best bekende zoutstructuur in Nederland. In de structuur zijn negen boringen uitgevoerd en in alle boringen werd caprock op het zout aangetroffen (figuur 29). De diepte van de top van de caprock neemt in zuidelijke richting toe. De top van het steenzout volgt dit beeld in grote lijnen. De caprock wordt door sedimenten van Miocene ouderdom bedekt.

Petrografie

Van de 6 m lange caprock kern bestaat de bovenste 3 m overwegend uit gips en daaronder 2,5 m uit anhydriet. De grens tussen beide typen gesteenten is scherp. In het anhydrietgedeelte komen subhorizontale open spleten voor, met langs de wanden haliet-kristallen. Deze zoutkristallen en subhorizontale spleten zijn een aanwijzing voor subhorizontaal vloeistoftransport. De onderste 50 cm van de kern bestaat uit grofkristallijne, slecht geconsolideerde gips. Het is niet bekend hoe het contact met het steenzout er uitziet.

Van de kern zijn gesteentemonsters genomen waarvan slijpplaatjes gemaakt zijn. De in verticale richting georiënteerde slijpplaatjes van de kern tonen een sterke invloed van rekristallisatie. Drie generaties aders werden herkend in de slijpplaatjes. Open spleten (tot 3 mm), die veelvuldig in het anhydrietgedeelte voorkwamen, zijn afwezig in de gips. Het bovenste gipsgedeelte vormt een dicht, relatief ondoorlatend gesteente. Massieve anhydriet is vermoedelijk eveneens ondoorlatend, maar waar dit door talloze spleten doorsneden wordt, maken deze het gesteente als geheel doorlatend.

Geochemie

De verdeling van CaO, SO_4 en water over het kerninterval geven een verdere verfijning van de gips - anhydriet verdeling in de kern. Op grond hiervan konden ook enkele gemengde lithologieën worden onderscheiden. De concentratie van een aantal belangrijke elementen (Si, Al, Mg, Fe, Mn, Na, K, Ti) in de caprock is zeer laag, hetgeen aangeeft dat de chemische samenstelling van de caprock zuiver gips en anhydriet is. In het anhydrietgedeelte van de kern is het gehalte aan Mg, K en Na wel iets hoger dat in het bovenste gipsdeel. De afwezigheid van Br in het gipsgedeelte van de kern geeft aan dat hierdoor geen zout water gediffundeerd is.

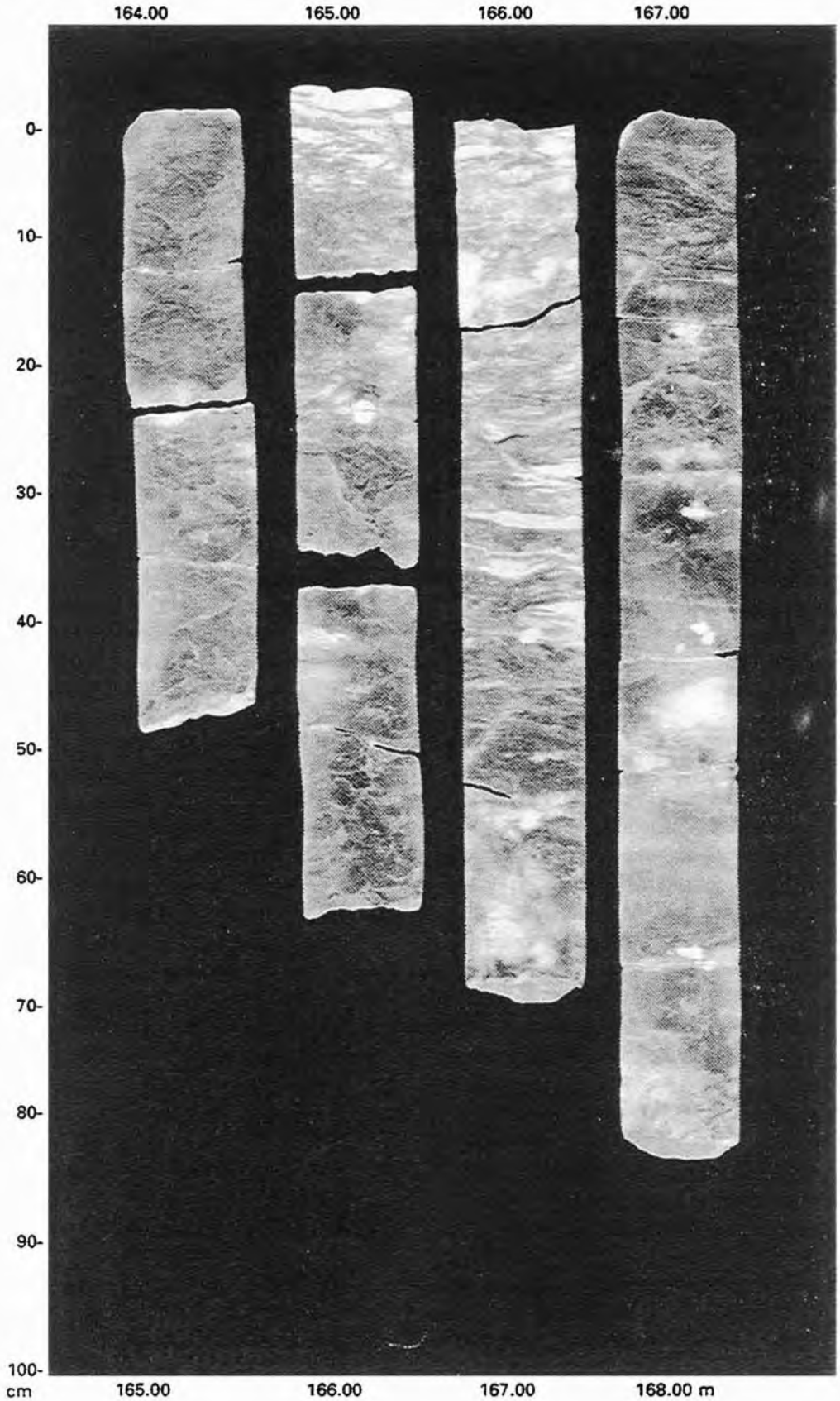
Stabiele isotopen

De $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotoop verhouding vertoont een duidelijke afname naar beneden in de kern, van 0,7074 naar 0,70725. De trend is niet afhankelijk van de Sr-concentratie of de minerale samenstelling gips of anhydriet. Deze trend vormt geen afspiegeling van de isotoopverhouding zoals deze aanwezig is tijdens de Zechstein Groep. Aangenomen dat de 6 m kern ongeveer een tijdspanne van 1 miljoen jaar omvat (Kyle et al., 1987) is het verschil in concentratieverhouding van 0,00015 onwaarschijnlijk groot om tijdens deze periode opgetreden te zijn. Dit verschil wordt derhalve toegeschreven aan de $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotoop verhouding van de vloeistoffen waarmee het steenzout in aanraking is geweest tijdens de vorming van de caprock. Onderzoek aan zout grondwater in het zuiden van de Verenigde Staten (Mississippi Salt Dome Basin) toont aan dat de $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotoop verhouding met de diepte toeneemt. Aangezien de zoutpijler Zuidwending zeker de laatste miljoen jaar geen grote variatie in diepteligging heeft doorgemaakt, is het in dit geval waarschijnlijk dat het grondwater een variërende $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio heeft gehad.

De $\delta^{18}O$ variatie toont geen trend langs de kern; de waarden hiervan variëren tussen -4 en -7 . De δD waarden zijn min of meer constant in de verst van het zout gelegen monsters en worden naar het zout toe in toenemende mate negatief. De verandering in de waarde bedraagt ongeveer 12 . Wanneer de $\delta^{18}O$ - δD verhouding van de Zuidwending monsters vergeleken wordt met metingen aan grondwater en metingen aan gipsmonsters uit Gorleben en Billingham, tonen de monsters van Zuidwending hogere $\delta^{18}O$ en δD waarden dan die uit de caprock van Gorleben (figuur 30). Het verschil wordt verklaard door de verandering in de isotoopsamenstelling van het regenwater als functie van de afstand tot de Atlantische Oceaan. De $\delta^{18}O$ - δD verhoudingen vertonen geen relatie met de oorspronkelijke evaporietopeenvolging.

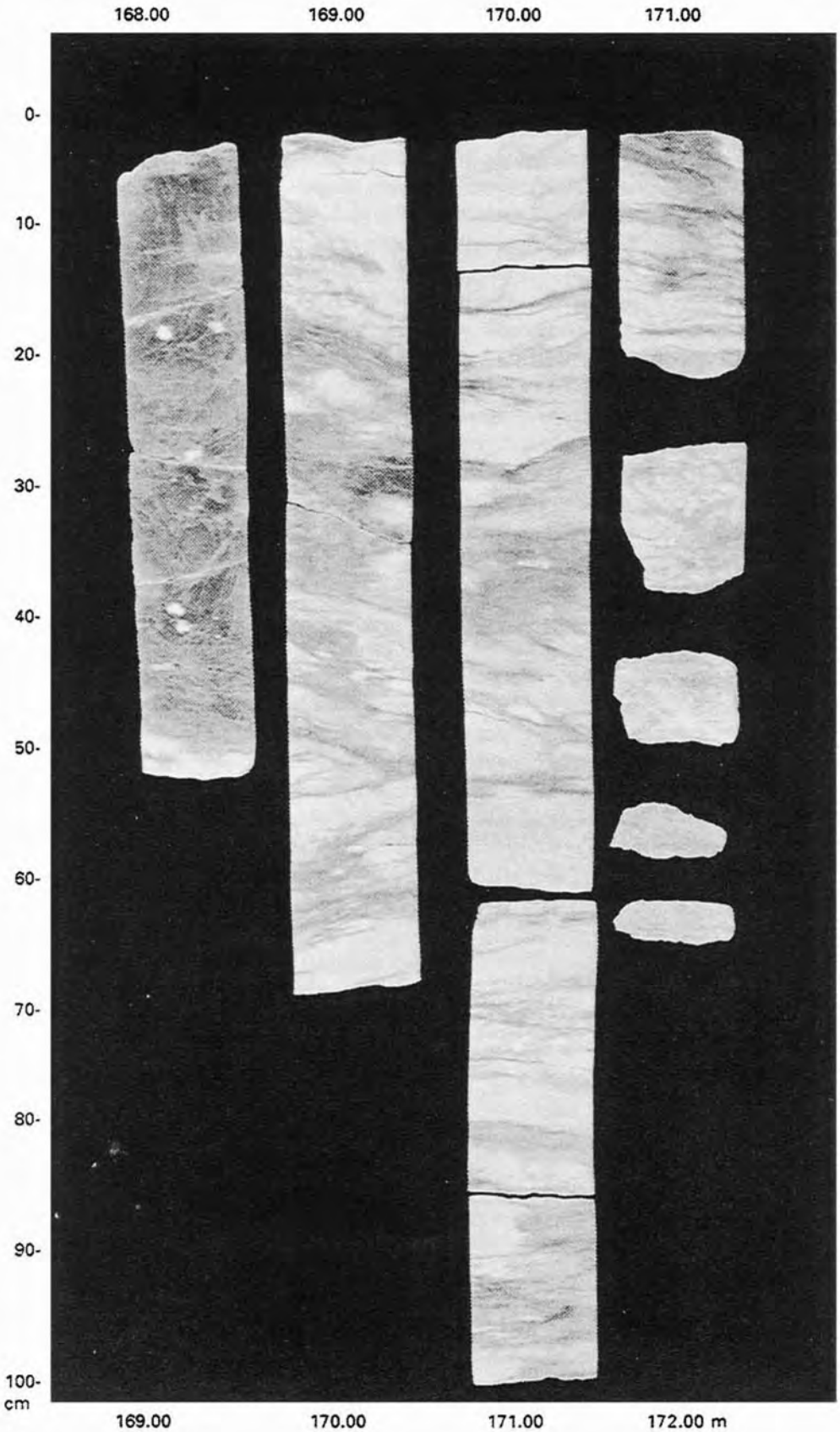
Een poging de caprock-kern te dateren middels de $^{238}U/^{206}Pb$ methode (Smith & Farquhar, 1989) leverde geen resultaat op; de hoeveelheid U en Pb in de kern bleek zodanig laag te zijn dat een betrouwbare bepaling van de isotoopverhouding niet mogelijk was. De verhouding tussen $^{207}Pb/^{204}Pb$ en $^{206}Pb/^{204}Pb$ toonden een grote spreiding. Dit kan enerzijds worden veroorzaakt door een oudere Proterozoïsche herkomst of, indien de monsters aanvankelijk een gelijke samenstelling hadden, op een grote invloed van post-depositionele processen. Afgezet tegen de lokatie op de kern geven de $^{207}Pb/^{204}Pb$ en $^{206}Pb/^{204}Pb$ een positieve trend met een toenemende saliniteit.

Paleomagnetisch onderzoek aan de kern leidde



Figuur 28A
Foto van de bovenste 3 meter van de Zuidwending-9-kern. De kern bestaat hier overwegend uit gips (donker), afgewisseld met dunnere anhydrietintervallen. In deze intervallen komen subhorizontale breuken en spleten voor.

Figuur 28B
Foto van de onderste 3 meter van de Zuidwending-9 kern. Dit deel van de kern bestaat overwegend uit anhydriet (wit) met talloze breukjes en aders.



niet tot resultaat, daar het magnetisme onder de detectiegrens van de meetapparatuur viel (<1 tot 10 micro Amp). Het ijzergehalte zelf werd voldoende hoog geacht, zodat de vermoedelijke oorzaak voor dit negatieve resultaat in het feit ligt dat het ijzer in niet-magnetische minerale of in colloïden aanwezig is.

Discussie

De opbouw van de Zuidwending caprock laat zich goed vergelijken met de door Kyle et al. (1987) beschreven caprock van de Winnfield zoutpijler in de Verenigde Staten. De zoutspiegel bij de Winnfield caprock toonde aanmerkelijke laterale verschillen, waarbij messcherpe contacten tussen het zout en de caprock naast contacten met gedeeltelijk geconsolideerd anhydrietzand voorkwamen; in enkele gevallen kwamen ook holten voor op dit contact, met onder hoge druk staande pekel. Op grond van boorbeschrijvingen en boorgatmetingen blijken ook in de pijler van Zuidwending dergelijke verschillen voor te komen. De afwezigheid van voldoende kernmateriaal staat echter meer gedetailleerde uitspraken niet toe. Zuidwending verschilt van Winnfield in het volgende opzicht: boven de zoutspiegel bevindt zich bij Zuidwending gipszand, bij Winnfield anhydrietzand. Dit wijst, gezien de stabiliteit van gips in relatie met temperatuur, op een lage saliniteit van de subroderende vloeistof bij de zoutpijler Zuidwending.

Een inventarisatie van in de literatuur beschreven structuren in caprocks geeft aan dat deze een preferentiële subhorizontale oriëntatie hebben (o.a. Kyle & Price, 1986; Batsche & Klarr, 1980; Bauer & Sessler, 1985; Bornemann & Fischbeck, 1986; Herbert et al., 1990; Melkert & Van der Gaag, 1992; Van der Poel et al., 1992). Dit wordt door de waarnemingen in Zuidwending onderschreven. Het transport van vloeistoffen zal dus preferentieel in een subhorizontale richting plaatsvinden in het onderste deel van de caprock. Het Na_2O-gehalte in het bovenste gipsdeel is vrijwel gelijk aan nul. In het anhydrietdeel worden iets hogere concentraties aangetroffen. Dit Na_2O profiel toont dat een gradiënt in de caprock afwezig is. Diffusie van vloeistoffen door de caprock wordt daarom onbelangrijk geacht en het ontbreken van Br in het bovenste gipsdeel van de caprock is een belangrijke aanwijzing hiervoor.

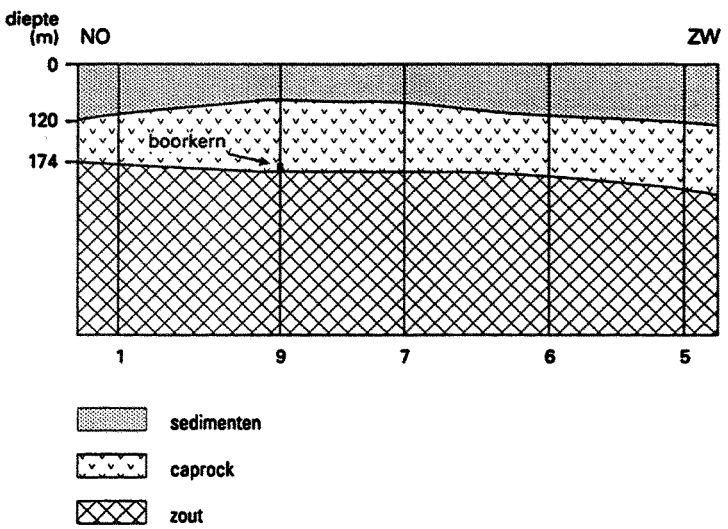
2.4.2 Modelmatige aspecten van het proces subrosie

Inleiding

In deze paragraaf worden met name de fysisch-chemische en hydrogeologische aspecten die relevant zijn bij de modellering van subrosie, samengevat. Vervolgens wordt een voor subrosie gebruikt model besproken. Tot slot worden er aanbevelingen gedaan voor de toekomstige modellering van subrosie.

Fysisch-chemische parameters

In volgorde van afnemend belang wordt de subrosie beïnvloed door de oplosbaarheid van het steenzout, de oplossnelheid van het zout en de stroomsnelheid en hoeveelheid van het aanstromend water (o.a. Durie & Jessen, 1964; Harvie et al., 1984).
Bij het oplossingsproces spelen de volgende

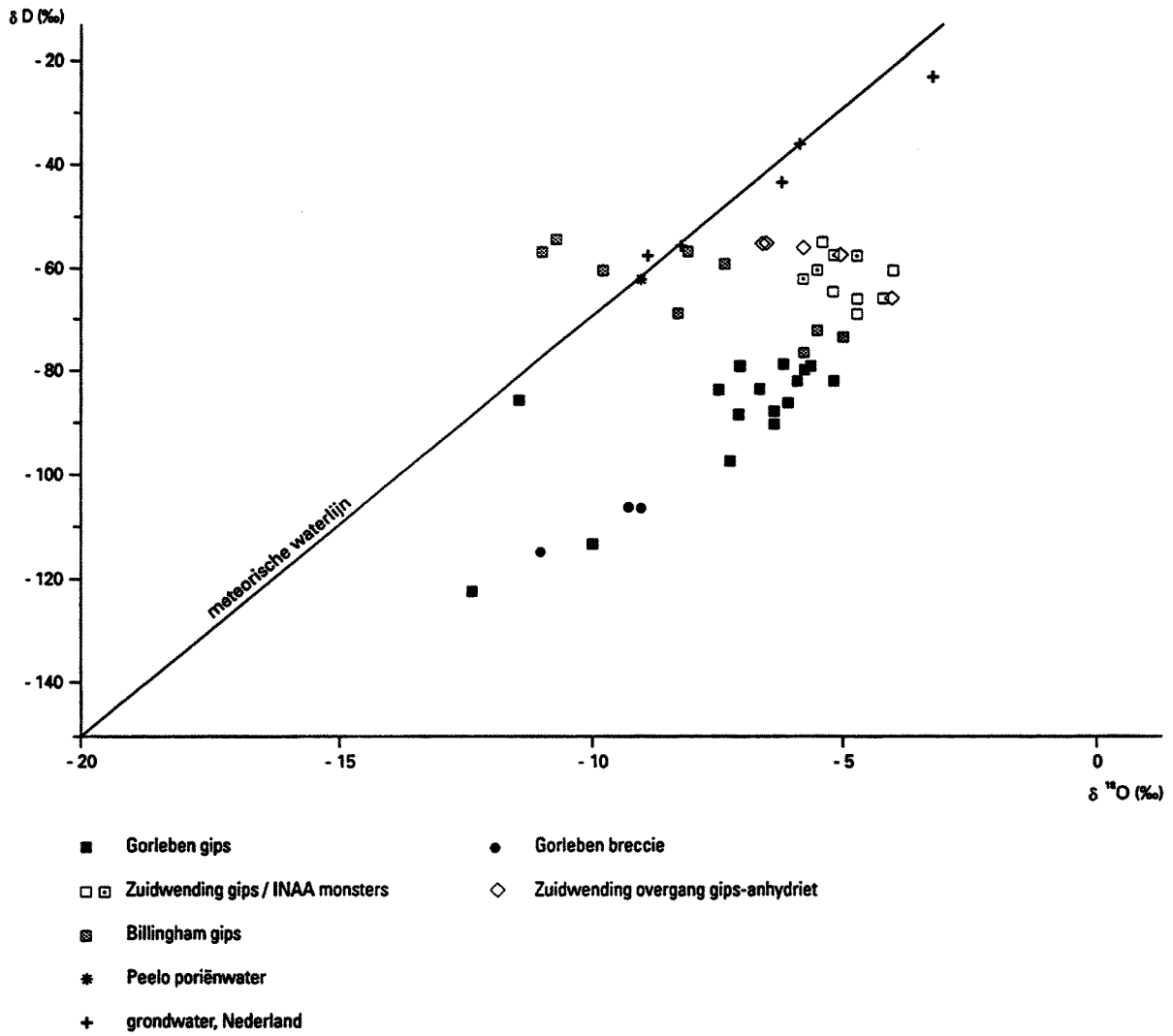


Figuur 29
Profiel door het bovenste deel van de zoutpijler Zuidwending op basis van 5 boringen. De positie van de bestudeerde boorkern is aangegeven.

begrippen al dan niet gerelateerde parameters een rol:
De *oplosbaarheid* is temperatuurafhankelijk en afhankelijk van zoutsamenstelling. De oplosbaarheid van NaCl neemt af bij toenemend gehalte aan andere zouten en toe met de druk. Voor de beschrijving van de oplosbaarheid van zouten als functie van deze parameters zijn modellen aanwezig (Harvie et al., 1984; Greenberg & Møller, 1989; Møller, 1988).
De *oplossnelheid* is afhankelijk van het maximale concentratieverschil tussen de grenslaag en de omringende vloeistof, de dikte van de grenslaag (geometrie van breuken en oplosholten boven de zoutspiegel), de mate van diffusie van de verschillende zouten (dus van de zoutsamenstelling) en de viscositeit van de grenslaag en de oplosbaarheid (Durie & Jessen, 1964; Röhr, 1980). De temperatuur heeft eveneens grote invloed op de oplossnelheid. Een 5 tot 10-voudige toename van de oplossnelheid wordt, afhankelijk van de samenstelling van de pekel, wordt waargenomen bij een temperatuurtoename van 10 tot 65 °C. Ook voor de beschrijving van de oplossnelheid bestaan modellen. Er wordt geen invloed van de druk op de oplossnelheid verwacht.

Hydrogeologische aspecten van subrosie

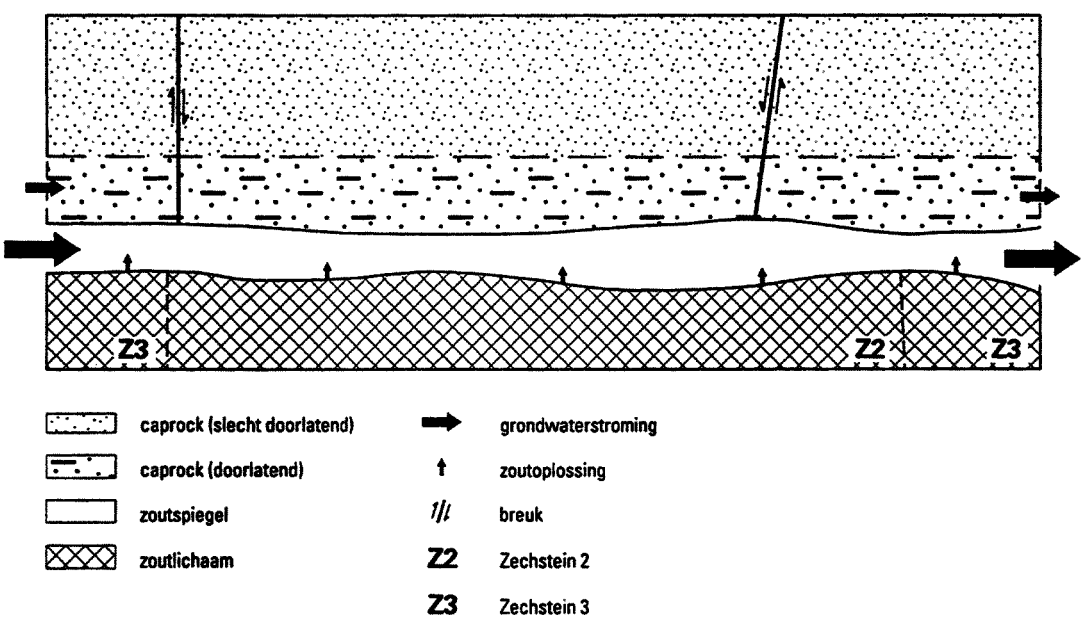
De hydrogeologische omstandigheden die een rol spelen bij subrosie, kunnen worden onderverdeeld in dynamische en externe omstandigheden. Dynamische omstandigheden worden door het proces zelf bepaald en externe omstandigheden worden niet of nauwelijks benvloed door het proces subrosie.



Figuur 30
Grafiek waarin de δ ¹⁸O verhouding uitgezet is tegen de δD verhouding voor monsters van Zuidwending, Gorleben, Billingham, poriënwater van de Peelo Formatie en van het grondwater in Nederland.

Dynamische omstandigheden: Dynamische omstandigheden zijn te splitsen in de toegankelijkheid van de caprock voor grondwater, de omstandigheden van het oplossingsproces zelf en de mogelijkheden van uittreding van verzadigd grondwater uit de caprock. Deze omstandigheden zijn onderling nauw gerelateerd en beïnvloeden elkaar sterk.
De toetreding van grondwater tot de zoutstructuren geschiedt onder invloed van een potentiaalveld in de waterdruk en de doorstromingscapaciteit van de aquifers rondom de zoutdiapier. Eveneens dragen lokale omstandigheden hiertoe bij. De wegen van toetreding zijn divers: via breuken en scheuren in de caprock, via doorlatende structuren in de caprock ten gevolge van oplossings- en omzettingsprocessen etc. Deze wegen zullen zowel in horizontale zin als in verticale zin toetreding mogelijk maken. Voor zover bekend worden nabij de zoutspiegel voornamelijk (sub-)-horizontale structuren aangetroffen (zie ook paragraaf 2.4.1). Het (sub-)horizontale oplossingsproces op of nabij de zoutspiegel wordt door de volgende dynamische omstandigheden beïnvloed: de doorlatendheid via scheuren en (oplossings)holten in het onderste deel van de caprock, de stroomsnelheid en mate van onderverzadiging van het grondwater, de heterogeniteit van het steenzout, oplossingsremmende structuren zoals anhydrietinschakelingen of andere afdekkingen van de zoutspiegel.
De uittreding van de door het oplossingsproces ontstane pekel zal eveneens via verschillende wegen plaatsvinden: scheuren en breuken in de caprock zijn hierbij van groot belang. Hierbij zal de grotere dichtheid van de pekel een rol spelen. Eveneens is denkbaar dat het dichtdrukken en de periodieke instorting van oplossingsholten als actief uitdrijvingsproces van belang is. De aan- en afvoer van grondwater respectievelijk naar en van de zoutstructuur kan zowel horizontaal als verticaal plaatsvinden. Dit kan ondermeer via breukzones in de caprock plaatsvinden.

Externe omstandigheden: Externe omstandigheden zijn onder meer de druk en temperatuur ter plaatse, de heersende gesteentedruk, de mate van halokinese, (laag-)samenstelling en eigenschappen van de aangrenzende aquifers en aquitards, potentiaal en stroming van grondwater rond de zoutdiapier.
Er worden binnen het onderzoeksgebied twee regimes van grondwaterstroming onderscheiden (Beekman et al., 1989; Oostrom et al., 1993). Het bovenste regime bevindt zich in ongeconsolideerde zanden, venen en kleien van Kwartaire en Tertiaire ouderdom tot een diepte van 100 à 300 m - NAP. De stroomsnelheid van het grondwater ligt hier tussen 0,35 en 35 m/jaar (Elderhorst & Zijl, 1992). Het bovenste regime wordt gekenmerkt door een relatief laag zoutgehalte (zoet tot brak).
Het onderste regime is gesitueerd in ongeconsolideerde sedimenten (voornamelijk kleien) van Vroeg-Tertiaire ouderdom. De hierin voorkomende watervoerende lagen zijn meestal geïsoleerd. Er vindt geen infiltratie vanuit het bovenste



Figuur 31
Een voorlopige schets van de opzet van een hydrogeologisch model voor de simulatie van zoutoplossing aan de top van een zoutpijler.

regime plaats. Grondwaterstroomsnelheden liggen tussen $0,35*10^{-4}$ en $0,35*10^{-2}$ m/jaar (Glasbergen, 1990; Elderhorst & Zijl, 1992). Het grondwater is in het algemeen brak.
Uit beschikbare gegevens wordt geconcludeerd dat in het algemeen de subrosiesnelheid van zoutdiapieren afneemt met de diepte. Variaties in subrosiesnelheid zullen zich echter ook bij dieper gelegen diapieren voordoen ten gevolge van de ruimtelijke variabiliteit van de permeabiliteit in aangrenzende aquifers. De afname van de subrosiesnelheid is met name het gevolg van de afnemende stroomsnelheid van het grondwater door de afnemende doorlatendheid.

Metropol-3 model

Door het Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne is het computermodel METROPOL-3 ontwikkeld, dat de subrosie en het zouttransport in de ondergrond simuleert (Hassanizadeh, 1986a, b; Hassanizadeh & Leijnse, 1988; Oostrom & Leijnse, 1992). In het model METROPOL-3 worden de grondwaterstroming onder invloed van druk- en dichtheidsverschillen, het oplossen van steenzout van een zoutdiapier en het transport naar de aangrenzende aquifer, de verspreiding van het opgeloste zout en andere opgeloste stoffen middels dispersie en grondwaterstroming gemodelleerd (Oostrom & Leijnse, 1992; Oostrom et al., 1993). De uitkomsten van de hier beschreven studie dienen onder meer als basis voor de verdere ontwikkeling van het METROPOL-3 model.

Voorgestelde toekomstige ontwikkeling van het subrosiemodel

Het inzicht in verschillende processen zal verder ontwikkeld moeten worden. Hierbij wordt gedoeld op het fysisch-chemisch modelleren van het oplosproces als een functie van temperatuur, zoutsamenstelling, grenslaagdikte etc. Verder is het modelleren van (sub)horizontale stroming langs de zoutspiegel van belang. Toevoer van het grondwater naar de zoutspiegel en afvoer naar een aangrenzende aquifer zal in een toekomstig model gedifferentieerd moeten worden aangepakt. Over flanksubrosie is te weinig bekend om tot een daadwerkelijke modellering over te gaan.

In een toekomstig te ontwikkelen subrosiemodel dienen de caprock, zoutspiegel en het zoutlichaam als aparte eenheden te worden opgenomen. In de caprock wordt een verder onderscheid gemaakt tussen het doorlatende en het slecht-doorlatende deel. De vloeistofdruk of -stroomsnelheid wordt aangenomen op grond van de diepteligging en hydrogeologische situering van de zoutpijler. Uit de diepteligging van de zoutstructuur kan de temperatuur aan de zoutspiegel worden afgeleid. Indien ook de chemische samenstelling van de instromende vloeistof bekend is, kan de oplossnelheid hieruit worden afgeleid (zie ook figuur 31).

2.4.3 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

1. Het onderzoek aan de boorkern van de caprock van de zoutpijler Zuidwending toont aan, dat de caprock uit een bovenste relatief impermeabele zone van 3 m gips bestaat, een middelste permeabele zone van 2,5 m anhydriet en een onderste, hoogst permeabele zone van 0,5 m gipszand. De permeabiliteit van het anhydrietgedeelte wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van subhorizontale aders en breuken.
2. Geochemische analyses tonen dat het anhydrietisch deel van de caprock aanrijkingen van sporenelementen vertoont ten opzichte van het gipsdeel. Met name natrium, kenmerkend voor zout in het systeem, is wel aanwezig in de anhydriet, maar nauwelijks in de gips. Uit het ontbreken van een geleidelijke afname van het natriumgehalte in de caprock kan worden opgemaakt dat deze geleidelijke afname ook niet aanwezig is in de vloeistoffen in de caprock.
3. De aanwezigheid van gips in plaats van anhydriet op de zoutspiegel toont aan, dat de oplossing van steenzout is geschied door vloeistoffen met een lage saliniteit. Dit wijst erop dat het opgeloste zout relatief snel werd afgevoerd.
4. Een nadere beschouwing van het proces subrosie toont aan dat dit proces wordt gecontroleerd door de hoeveelheid rondom de zoutstructuur beschikbare grondwater, de mate van onderverzadiging aan NaCl, de stroomsnelheid van het grondwater en de oplosbaarheid en oplossnelheid van de aanwezige zouten. De subrosie wordt het sterkst bepaald door de stroomsnelheid in de aquifer, die sterk diepteafhankelijk is. Uit gegevens van de zoutmijnbouw en laboratorium experimenten blijkt dat de oplosbaarheid en de oplossnelheid van de zouten groter worden bij een toenemende temperatuur en dat de genoemde factoren beïnvloed worden door de chemische samenstelling van het

oplosmiddel.

Aanbevelingen

1. Het inzicht in het fysisch-chemisch modelleren van het oplosproces als een functie van temperatuur, zoutsamenstelling, grenslaagdikte etc zal verder ontwikkeld moeten worden. Daarnaast dient aandacht gewijd te worden aan het modelleren van (sub-)horizontale stroming langs de zoutspiegel. Toevoer van het grondwater naar de zoutspiegel en afvoer naar een aangrenzende aquifer zal gedifferentieerd moeten worden aangepakt. Over flanksubrosie is vooralsnog te weinig bekend om tot een daadwerkelijke modellering over te gaan.
2. Voor de identificatie en beschrijving van het subrosieproces in Noordoost-Nederland bestaat een groot tekort aan veldwaarnemingen. Voor effectief modelleren van subrosie zijn velddata nodig van lokatiespecifieke hydrogeologische omstandigheden van de zoutdiapier, eigenschappen van aangrenzende aquifers en aquitards. Voor studie van caprock- en steenzouteigenschappen en fysisch-chemische gegevens van grondwater in de caprock is beschikbaarheid van boorkernen een vereiste.

Referenties

Batsche, H. & K. Klarr (1980). Beobachtung und Gedanke zur Gipshutgenese. Fifth International Symp. on Salt. N. Ohio Geol Soc., vol. 2, p. 9-19.

Bauer, G. & W. Sessler (1985). Das Deckgebirge über zwei norddeutschen Salzstocken in den Wetterschachten Kolenfeld und Riedel. Kali und Steinsalz, vol. 9, p. 125-131.

Beekman, H.E., P. Glasbergen, A.F.M. Slot & H.F. Prins (1989). Inventarisatie en evaluatie van hydrogeologische gegevens van Noordoost en Oost Nederland ten behoeve van het onderzoek naar de opberging van radioactief afval in zoutformaties. RIVM rapport no. 728512005, 242 p.

Bornemann, O. & R. Fischbeck (1986). Ablaugung und Hutgesteinsbidung am Salzstock Gorleben. Z. Dt. Geol. Ges. 137, p. 71-83.

Durie, R.W. jr. & F.W. Jessen (1964) Mechanisms of the Dissolution of Salt in the formation of Underground Salt Cavities. Society of Petroleum Engineers, vol. 4, p. 183-190.

Elderhorst, W.I.M. & W. Zijl (1992). Large-scale steady state hydrogeological modelling. TNO Institute of Applied Geosciences, report OS 92-05C.

Glasbergen, P. (1990). The interaction between diapirism, caprock growth, and salt solution in The Netherlands as an example of a sedimentary basin. In: Proceeding of Symposium on diapirism, vol. 2, p. 191-210.

Greenberg, J.P. & N. Møller (1989). The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model for the Na-K-Cl-SO_4-H_2O system to high concentration from 0 to 250 °C. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 53, p. 2503-2518.

Harvie, C.E., N. Møller & J.H. Weare (1984). The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO_4-OH-HCO_3-CO_3-CO_2-H_2O system to high ionic strengths at 25C. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 48, p. 723-751.

Hassanizadeh, S.M. (1986a). Derivation of basic equations of mass transport in porous media, 1, Macroscopic balance laws. Adv. water resources, vol. 9, p. 196-206.

Hassanizadeh, S.M. (1986b). Derivation of basic equations of mass transport in porous media, 2, Generalized Darcy's and Fick's laws. Adv. water resources, vol. 9, p. 207-222.

Hassanizadeh, S.M. & A. Leijnse (1988). On the modelling of brine transport in porous media. Water resources research, vol. 24, no. 3, p. 321-330.

Herbert, H-J., O. Bornemann & R. Fischbeck (1990). Die isotopen zusammensetzung des Gipskristallwassers im Hutgestein des Salzstocks Gorleben - ein Nachweis für die elsterzeitliche Bildung der Hutgesteinsbrekzie. Kali und Steinsalz 10, p. 215-225.

Kyle, J.R. & P.E. Price (1986). Metallic sulphide mineralization in salt-dome cap rocks, Gulf Coast, U.S.A. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.), vol. 95, B6-B13.

Kyle, J.R., M.R. Ulrich & W.A. Gose (1987). Textural and paleomagnetic evidence for the mechanism and timing of anhydrite caprock formation, Winnfield salt dome, Louisiana. In: I. Lerche & J. J. O'Brien (red.). Dynamical geology of salt and related structures, p. 497-542.

Melkert, M.J. & P. van der Gaag (1992). Caprock studies deelproject I. Het ontstaan van caprock. Groundcontrol, Rotterdam, 87 p.

Møller, N. (1988). The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model for the Na-Ca-Cl-SO_4-H_2O system, to high temperature and concentration. Geochimica et Cosmochimica

Acta 52, p. 821-837.
Oostrom, M. & A. Leijnse (1992). Study concerning the effects of waste disposal in an example rock salt formation (SESAM). Simulation of the subrosion process with the METROPOL-3 code. National Institute of Public Health and Environmental Protection Report 725205002.
Oostrom, M., K. van Gijssel & W. Zijl (1993). Modelling subrosion and groundwater flow in the vicinity of the Zuidwending salt diapir on the basis of geometrical and (palaeo-)-hydrological conditions in the northeastern Netherlands. RGD report 30.102, project Geo-1A, Opla Fase 1A.
Poel, H.M. van der, P. van der Gaag & M.J. Melkert (1992). Caprock studies deel II. Natuurlijke processen in caprock. Groundcontrol, Rotterdam. 76 p.
Röhr, H.U. (1980). Rates of dissolution of salt minerals during leaching caverns in salt - fundamentals and practical application. In: A.H. Coogan & L. Hauber (red.). Fifth symposium on salt, the northern Ohio geological society, vol. 2, p. 125-137.
Smith, P.E. & R.M. Farquhar (1989). Direct dating of Phanerozoic sediments by the $^{238}U/^{206}Pb$ method. Nature, vol. 341, p. 518-521.

2.5 Fluviatiele en subglaciale erosie

2.5.1 Algemene beschouwing van het proces fluviatiele erosie

Inleiding

De landvorm wordt voornamelijk bepaald door de wisselwerking tussen erosie- en sedimentatie-processen. Erosie en sedimentatie zijn op hun beurt het gevolg van complexe wisselwerkingen tussen verschillende geologische, klimatologische en biologische processen.

Enkele van de meest belangrijke processen die ten grondslag liggen aan de vorming van het Nederlandse landschap tijdens het Kwartair zijn klimatologische processen, de daar gebonden zeespiegelfluctuaties en tektonische bodembewegingen. Hoe deze processen, te zamen met andere - minder invloedrijke - processen, het gedrag van rivieren op de Nederlandse ondergrond hebben bepaald en in de toekomst zullen bepalen is het onderwerp van dit hoofdstuk.

Schalen en processen

Erosie en sedimentatie worden in belangrijke mate bepaald door ruimte en door tijd. Het is daarom van essentieel belang om - alvorens over te gaan op een nadere bestudering van de wisselwerkingen tussen verschillende processen - duidelijk te bepalen welke ruimteschalen en welke tijdschalen worden gehanteerd, en wat de relaties tussen deze verschillende schalen en de besproken processen zijn. Sommige processen verlopen snel (stormen), andere langzaam (diepzee sedimentatie); sommige beïnvloeden een zeer groot gebied (klimaat), andere zijn slechts zeer lokaal van invloed (klink door wateronttrekking). Diezelfde processen gezien op een andere ruimte- of tijdschaal kunnen ook weer een heel andere invloed hebben: een zware storm op de Nederlandse kust kan lokaal of regionaal van groot belang zijn, maar zal volkomen verwaarloosbaar zijn op een nog grotere ruimteschaal of binnen de context van de Holocene geschiedenis. In tabel 5 worden de verbanden tussen de ruimtelijke schalen en de tijd getoond.

Variabiliteit van het fluviatiele systeem

Bij elke studie van fluviatiele processen moet rekening worden gehouden met een zevental factoren/parameters die de variabiliteit van het systeem bepalen. Schumm (1988) heeft deze factoren uitgebreid behandeld, hier worden slechts de hoofdlijnen aangegeven.

Schaal: Zoals reeds in tabel 5 is weergegeven, kan gesteld worden dat hoe korter de tijdsduur

Tabel 5
*Relaties tussen de ruimte- en de tijdschalen. * in deze paragraaf behandelde schalen.*

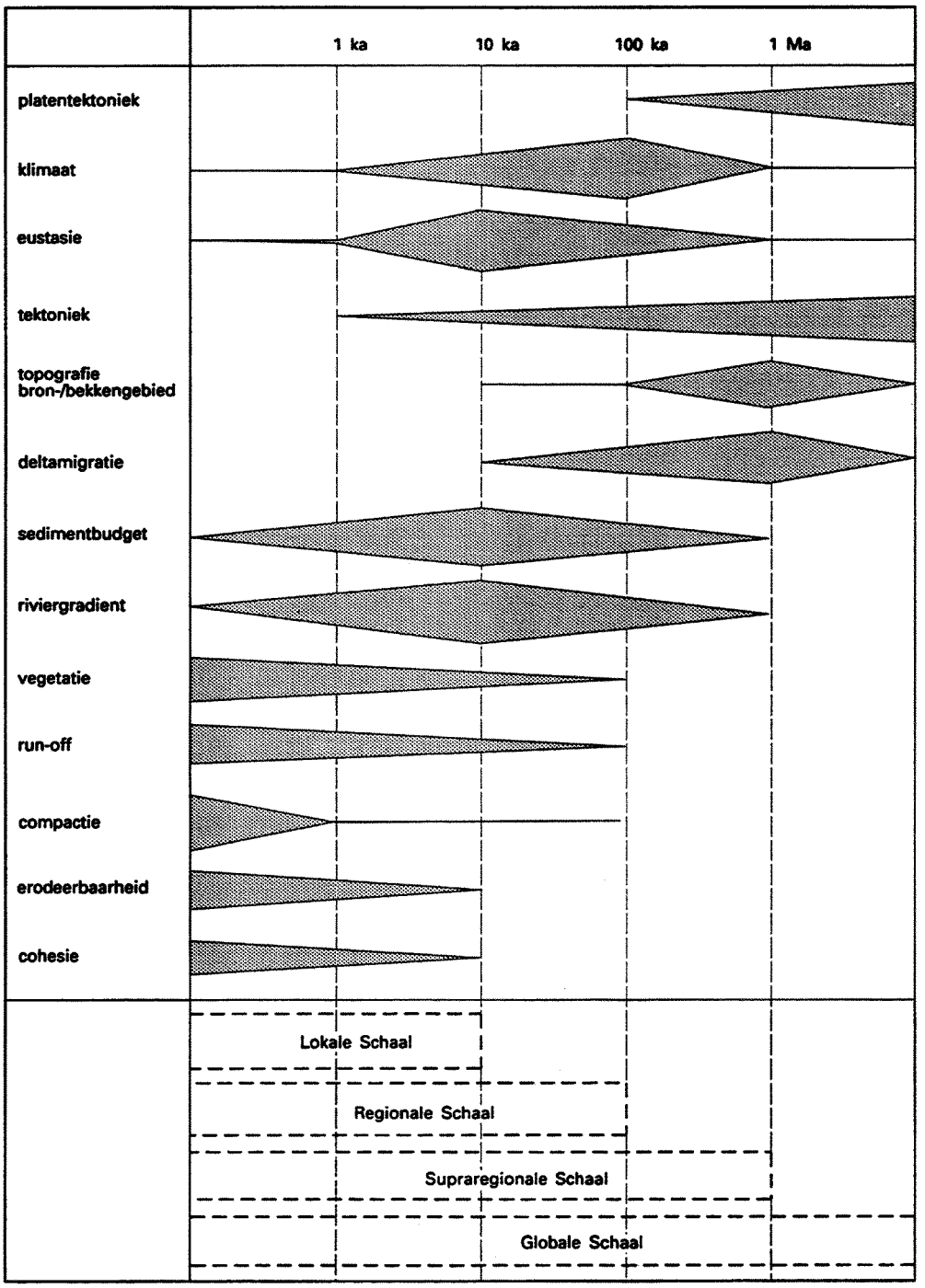
Ruimteschalen	Oppervlakte (km²)	Overeenkomend met	Tijdschaal
Infra-Lokaal (ILS)	$< 10^3$	Gemeente	< 1 ka
Lokaal (LS) *	$10^3 - 10^4$	Noord-Nederland	1 - 10 ka
Regionaal (RS) *	$10^4 - 10^5$	Nederland	100 ka
Supraregionaal (SRS) *	$10^5 - 10^7$	Europa	1 Ma
Globaal (GS) *	$> 10^7$	Tektonische plaat	> 1 Ma

van een proces, hoe kleiner het oppervlak is waarop het proces zich afspeelt. Bovendien: hoe sneller het proces, hoe beter het begrip daarvan en hoe beter in ruimte en tijd geëxtrapoleerd kan worden.

Plaats: Fluviatiele processen spelen zich niet synchroon af in het totale fluviatiele systeem. Lokale omstandigheden veroorzaken erosie op één plek en sedimentatie elders. Verlaging van de erosiebasis (base level of erosion) veroorzaakt terugschrijdende erosie in het fluviatiele systeem en kan zich over een periode van honderdduizenden jaren uitstrekken.

Convergentie: Verschillende processen en oorzaken kunnen vergelijkbare effecten op het fluviatiele systeem hebben. Verticale erosie kan zowel veroorzaakt worden door verlaging van de erosiebasis als door tektonische opheffing.

Divergentie: Vergelijkbare processen en



Figuur 32
Diagram van processen en de bijbehorende tijdschaal en ruimteschaal voor de Nederlandse situatie.

Tabel 6 Onderverdeling van de behandelde processen op de Lokale en de Regionale schaal.

Schaal	Exo-processen	Meso-processen	Endoprocessen
RS	Eustatisch zee spiegelfluctuaties	Vegetatie	Laterale delta-migratie
LS + RS	Klimaat	Run-off	Riviergradiënt
LS + RS	Lokale tektoniek		Sediment budget
LS + RS			Compactie
LS			Cohesie
LS			Erodeerbaarheid

oorzaken kunnen verschillende effecten hebben op het fluviatiele systeem. Een verhoogde afwatering zal meanderontwikkeling in een rechte stroom veroorzaken, maar ook de verandering van een meanderend systeem tot een vlechtend systeem.

Singulariteit: Elke landvorm, wanneer in detail beschouwd, is uniek. Respons van de landvorm op verandering zal daarom verschillend zijn in ruimte en tijd.

Sensitiviteit: De gevoeligheid van een systeem voor verandering is afhankelijk van bepaalde drempelwaarden. Beneden deze drempelwaarden zal verandering geen of nauwelijks effect hebben op het systeem, daarboven zal zelfs een kleine variatie grote gevolgen kunnen hebben. Een meanderboog kan, onder bepaalde condities, zich versneld ontwikkelen en doorbreken terwijl de meander bogen in de omgeving stabiel blijven of zich slechts langzaam ontwikkelen.

Complexiteit: Aanpassing aan veranderende condities gebeurt op een complexe, niet-geleidelijke wijze binnen het fluviatiele systeem. De migratie van een verjongingsgolf binnen een fluviatiel systeem heeft een ingewikkelde stroomopwaarts gerichte evolutie tot gevolg die zeer moeilijk te kwantificeren is.

Processen en procesinteracties

De invloed van de mens op het proces erosie en sedimentatie kan op beperkte schaal vaak zeer sterk zijn, terwijl deze op wereldschaal nog onzeker is (Houghton et al., 1990 & 1992; Warrick et al., 1990). De relevante ruimtelijke schalen en de tijdschaal zijn voor Nederland weergegeven in figuur 32. Deze schalen worden hieronder - in relatie tot de relevante processen - afzonderlijk besproken.

De Lokale Schaal (LS)

De Lokale Schaal (LS) beslaat een gebied van 10^3 tot 10^4 km^2 over een periode tussen 1 en 10 ka (figuur 33). In tabel 6 wordt de onderverdeling van de verschillende processen weergegeven in samenhang met de hier behandelde schalen.

Klimaat: Dit is een proces op wereldschaal dat de belangrijkste motor achter de ijstijd cycli en derhalve de grote zeespiegelfluctuaties tijdens het Kwartair was. Wanneer deze teruggebracht is tot een versimpelde temperatuurcurve voor een willekeurig stadiaal/interstadiaal cyclus, is het mogelijk de klimaatbeïnvloeding te tonen op verschillende processen tijdens zo'n cyclus (figuur 34). Over een langere tijdschaal gerekend (glaciaal/interglaciaal cyclus), wordt de netto ratio tussen erosie en sedimentatie bepaald door de cumulatie van verschillende - kortere - cycli.

Eustatische zeespiegelfluctuaties: Deze hebben een dominante invloed op fluviatiele erosie en sedimentatie, niet in de laatste plaats door de relatief grote snelheid waarmee deze fluctuaties tot stand komen. Zeespiegeldaling van circa 130 m als gevolg van de glaciale landijs-bedekking, m.n. tijdens het Weichselien, is geconstateerd langs het atlantisch continentaal plat (Fisk, 1944; Fisk & McFarlane, 1955). Dit had een belangrijke erosiebasis verlaging van de fluviatiele systemen tot gevolg, waarbij het complexe aanpassingsgedrag beïnvloed werd door run-off fluctuaties als gevolg van de verschuiving van de klimaatgordels. De erosiebasis van de Rijn en de Maas werd toen voor een belangrijk deel beïnvloed door de natuurlijke drempel in het Nauw van Calais op circa 60 m onder NAP.

Lokale tektoniek: Zowel plaattektonische processen als glaciale isostasie spelen in Nederland en rol bij de verticale tektonische

bewegingen die het fluviatiele gedrag kunnen beïnvloeden. Verticale bodemdaling tijdens het Kwartair varieert in Nederland tussen 6 en 17 cm/ka in Noord-Holland (de Gans, 1991) en bedraagt circa 3 cm/ka in Noordoost-Nederland.

Vegetatie, run-off en sedimentbudget: Vegetatie beïnvloedt in hoge mate de run-off (hydrologische component) en het sedimentbudget (lithologische component) van fluviatiele systemen. Dit gebeurt via een zeer complexe wisselwerking waarbij reliëf, riviergradiënt, erodeerbaarheid en klimaat een grote rol spelen.

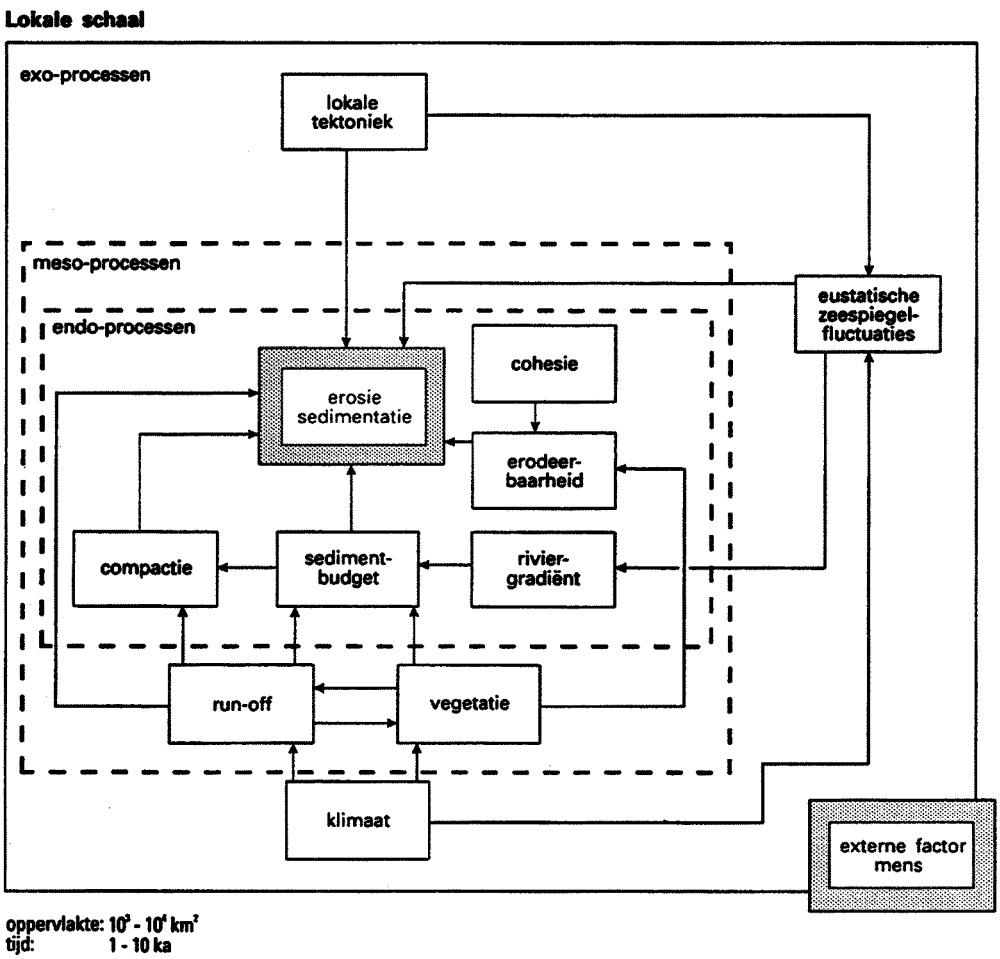
Riviergradiënt: Wordt vooral bepaald door eustatische zeespiegelfluctuaties. Reliëf en dus gradiënt beheersen het sedimentbudget van het fluviatiele systeem. In Nederland bedroeg de riviergradiënt circa 20 tot 25 cm/km tijdens de laatste helft van het Kwartair.

Compactie, cohesie en erodeerbaarheid: Op de tijdschalen die worden gebruikt voor deze studie, is compactie waarschijnlijk een ondergeschikt proces. Compactie van klei of veen, afgezet/gevormd in de riviervlakte, bedraagt respectievelijk circa 75 en 90%.
Cohesie en erodeerbaarheid (van b.v. klei of zand) bepalen op een selectieve wijze de mate van erosie in verschillende trajecten van een fluviatiel systeem.

De Regionale Schaal (RS)
De Regionale Schaal (RS) beslaat een gebied van 10^4 tot 10^5 km² over een periode van circa 100 ka.

Astronomische processen, klimaat en zeespiegelfluctuaties: Astronomische processen zoals de Milankovitch cycli beïnvloedden de klimatologische variaties tijdens het Kwartair (zie paragraaf 2.5.2), en dus de zeespiegelfluctuaties. Op de Regionale Schaal wordt het fluviatiele systeem vooral bepaald door complete klimaat- en zeespiegelcycli.

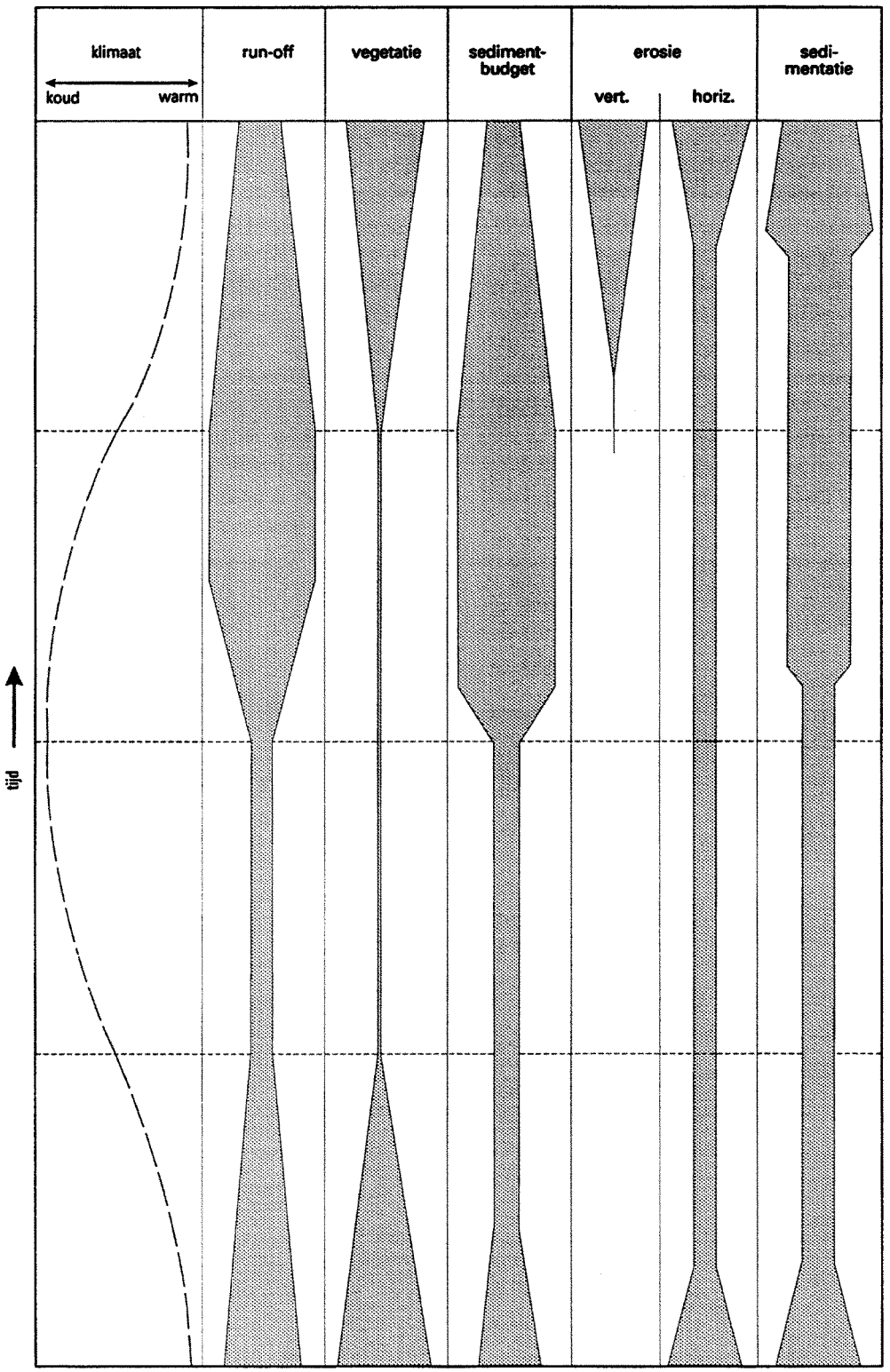
Lokale tektoniek: Op de Regionale Schaal wordt de tektonische daling gekarakteriseerd door een wisselende mate van verticale beweging:



Figuur 33
Procesrelaties op de Lokale Schaal.

periodes van hoge tektonische activiteit wisselen af met periodes van relatieve rust.

Laterale deltamigratie: Laaglandrivieren hebben de neiging om regelmatig hun stroombedding te verleggen door consequent de kortste en laagste weg naar zee te kiezen. Deltalobben worden aldus regelmatig verlaten ten gunste van een nieuw depocentrum (b.v. de Mississippi of de Gele Rivier).



Figuur 34
Relevante processen en hun invloed op erosie en sedimentatie tijdens een interstadiaal/stadiaal cyclus.

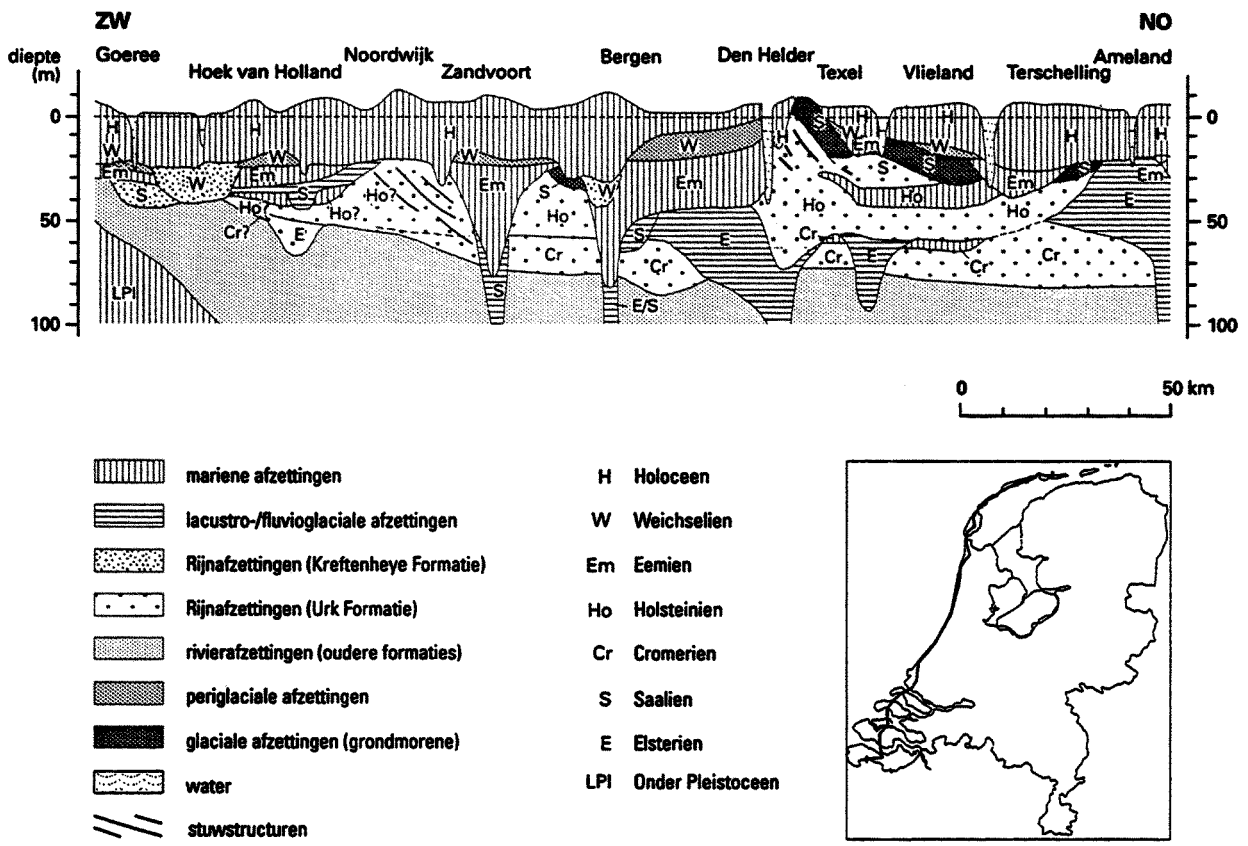
De Supraregionale Schaal (SRS) en de Globale Schaal (GS)

Wanneer de ruimtelijke schaal groter is dan 10^5 km^2 en de tijdschaal 1 Ma overschrijdt, verliezen de Endo- en de Meso-processen hun belang en blijven alleen de grootschalige processen een rol spelen. De topografie van het fluviatiele drainage gebied en grootschalige (plaat-)tektonische bewegingen gaan het gedrag van fluviatiele systemen in hoge mate bepalen. De Rijndal Slenk is tijdens het Kwartair met 230 cm/ka verbreed en met 50 cm/ka dieper geworden (Kukal, 1990), voor het grootste deel gecompenseerd door sedimentatie. In de Roerdal Slenk in Nederland is tijdens dezelfde periode een netto-sedimentatie-snelheid te berekenen van circa 10 tot 25 cm/ka (Ouderdom Kwartair 2,3 Ma; Zagwijn, 1989). Voor Noord-Nederland varieert de netto-sedimentatie-snelheid in dezelfde periode tussen 2 en 20 cm/ka.

Aspecten van fluviatiele erosie en sedimentatie in Nederland

Het Kwartair wordt gekenmerkt door een afwisseling van verschillende Glaciaal/Interglaciaal cycli met bijbehorende zeespiegel-fluctuaties. Koude periodes worden overheerst door fluviatiele en eolische sedimentatie; de overgang van koud naar warm door vooral erosie; warme periodes tenslotte door vooral sedimentatie onder mariene tot fluviatiele omstandigheden. Het op dit moment best onderzochte tijdvak in Nederland is de periode vanaf het Eemien waarvan de sedimenten relatief dicht onder het oppervlak voorkomen.

Erosie: Uit figuur 35 valt af te leiden dat in West-Nederland de top van de Eem Formatie sterk is afgevlakt door erosie onder ijs (de Gans, 1991). Rekening houdend met de tektonische daling, blijkt ongeveer 17 m sediment te zijn verdwenen vóór de afzetting van de grotendeels eolische Formatie van Twente. Uit figuur 35 valt bovendien af te leiden dat de Rijn diepe erosiedalen heeft uitgesleten, vermoedelijk in de tweede helft van het Weichselien. In de erosiedalen komen grove afzettingen voor van de Formatie van Kreftenheye. Rekening houdend met differentiële tektonische daling blijkt de fluviatiele erosie van de Rijn circa 20 m te bedragen over een periode van 70.000 jaar of minder.
Circa 100 km meer stroomopwaarts worden



Figuur 35
Dwarsdoorsnede door West-Nederland (de Gans, 1990).

verschillende afzettingen van de Formatie van Kreftenheye onderscheiden, in ouderdom variërend tussen Midden-Saalien en Vroeg-Holoceen (Verbraeck, 1984). De riviergradiënt bedraagt ongeveer 20 tot 25 cm/km. Ook van dit gebied is een maximale erosiediepte van circa 20 m berekend voor het Laat-Saalien, minimaal 10 m voor het Midden-Weichselien (Pleniglaciaal) en circa 8 m voor het Laat-Glaciaal aan het eind van het Weichselien.
In Limburg, waar de riviergradiënt van de Maas circa 75 cm/km bedraagt, is de maximale erosie tijdens het Weichselien ongeveer 10 m (van den Berg, 1988 & 1990; van den Berg & Schwan, in druk; Felder & Bosch, 1989).
In Noord-Nederland (de Groot et al., 1987; Bosch, 1990) is een maximale erosiediepte van circa 18 tot 23 m over een periode van 70.000 jaar of minder berekend in kleine beekdalsystemen die tijdens het Weichselien actief waren.

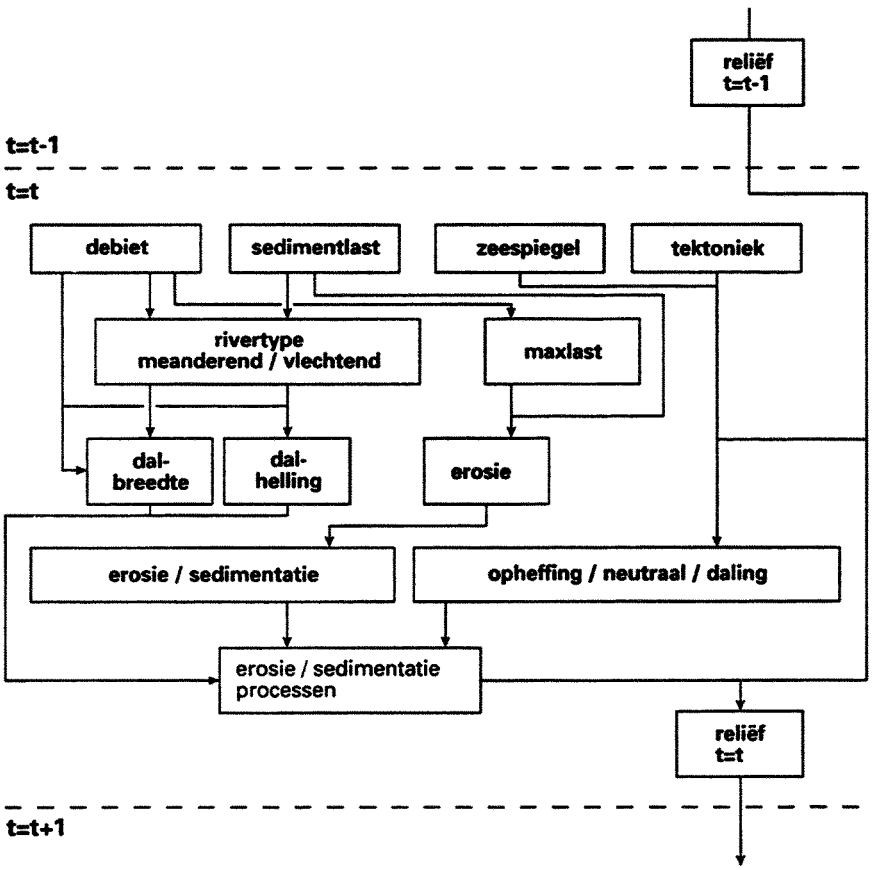
Sedimentatie: Netto-sedimentatiesnelheden zijn sterk afhankelijk van tijd (binnen een Glaciaal/Interglaciaal of Stadiaal/Interstadiaal) en plaats (ten opzichte van de kustlijn, in relatie tot zeespiegelstijging). Westwaarts is hij beduidend groter, vooral door de sterke invloed van de zeespiegelstijging. Van west naar oost varieert de netto-sedimentatie tussen 80 cm/ka en 30 cm/ka voor de tweede helft van het Weichselien, tussen >1000 cm/ka en circa 160 cm/ka voor het Laat-Weichselien/Vroeg-Holoceen. Hiermee contrasteren de sedimentatiesnelheden van het Vroeg-Weichselien: circa 10 cm/ka.

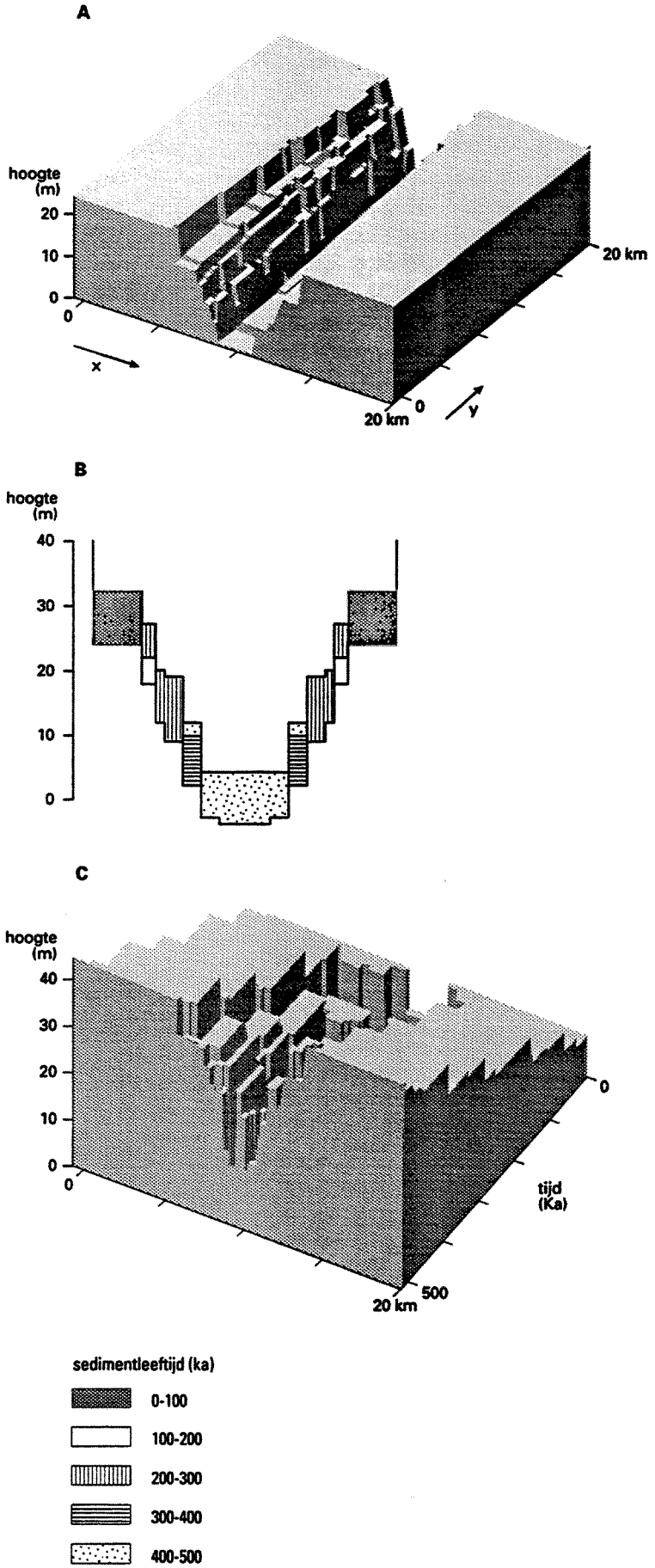
2.5.2 Modellering van fluviatiele erosie

Een fluviatiel erosiemodel behoort, binnen de Nederlandse geologische context, lange-termijn processen (100 tot 500 ka) te simuleren die afhankelijk zijn van klimaat, eustatische zeespiegelfluctuaties en tektoniek. In de vorige paragraaf is aangegeven dat deze factoren het proces fluviatiele erosie sturen. Het FLUVER model dat voor deze studie is ontwikkeld, bouwt verder op een eerder fluviatiel terrassenmodel (Veldkamp & Vermeulen, 1988; Veldkamp, 1991; Veldkamp & van den Berg, in druk).

FLUVER is een z.g. finite-state model, d.w.z. een model dat zowel kwantitatieve als kwalitatieve

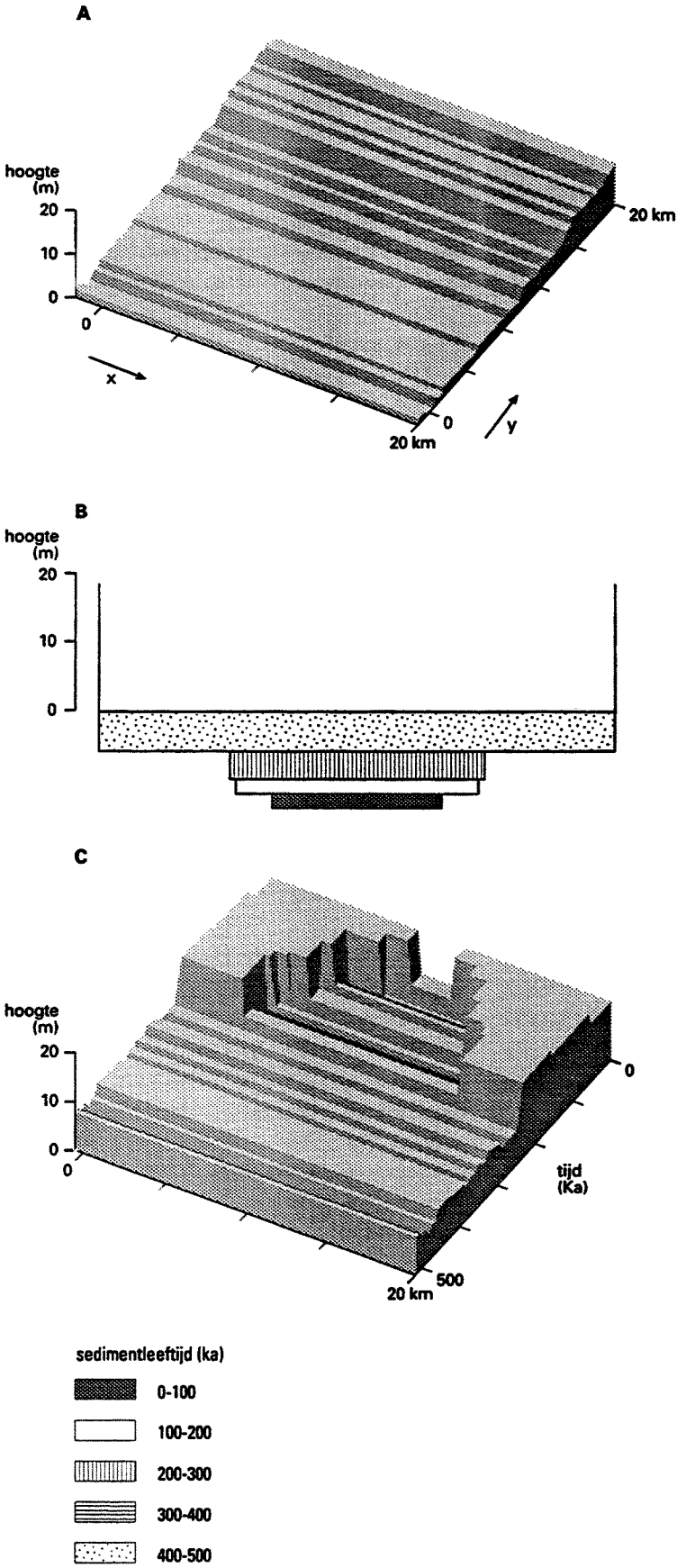
Figuur 36
Stroomdiagram van het FLUVER model.





Figuur 37
Uitvoer van FLUVER simulatie 1: A. Het reliëf van het landschap na 500 ka; B. Doorsnede van het landschap op gridlijn y = 90 (= 18 km) na 500 ka. Sedimentleeftijd in tijdstappen; C. Systeemdynamiek (x-t-z diagram) op gridlijn y = 90 na 500 ka.

Figuur 38
Uitvoer van FLUVER simulatie 2: A. Het reliëf van het landschap na 500 ka; B. Doorsnede van het landschap op gridlijn y = 90 (= 18 km) na 500 ka. Sedimentleeftijd in tijdstappen; C. Systeemdynamiek (x-t-z diagram) op gridlijn y = 90 na 500 ka.



relaties hanteert (figuur 36). Het simuleert een landschap bestaande uit gridcellen (x,y,z) van 200 × 200 × 1 m, in tijdstappen van 2 ka, over een periode van 500 ka. Door deze - noodzakelijkerwijs - grote tijdsprongen kan het model niet gevalideerd worden met bestaande meetreeksen en is het alleen te gebruiken voor lange termijn simulaties. Verticale erosie voorspellingen worden door FLUVER nauwkeurig weergegeven omdat het model hier relatief gevoelig voor is.

Het FLUVER model houdt rekening met de mate van erosie en sedimentatie, de systeem condities, de grenscondities en de reliëf veranderingen.
Het model hanteert vier input variabelen: initieel reliëf (een vlakke topografie met een vlak, recht rivierdal van 8 km breed bij 5 m diep), klimaat (gebaseerd op een vereenvoudigde Milankovitch curve), tektoniek (globale opheffing of globale daling) en erosiebasis; dit betreft een simulatie van zeespiegelfluctuaties.

De volgende output variabelen worden door het model FLUVER in een GIS database opgeslagen: voor elk x,y-coördinaat wordt de hoogte (in meters) berekend, en - voor de bovenste 10 m - de sedimentatie ouderdom en de klimaatkarakteristieken (glaciaal, interglaciaal, overgang). Deze gegevens kunnen aansluitend weergegeven worden door middel van een contourpakket. In het onderstaande worden de resultaten van een tweetal verschillende simulaties met behulp van dit model gepresenteerd.

Simulatie 1
Deze simulatie wordt gekenmerkt door globale klimaat- en erosiebasis variabelen en tektonische opheffing van 0,1 m/ka, zoals berekend voor het Maasdal in Limburg (van den Berg, mond. med.). Na 500 ka, is het gesimuleerde landschap veranderd in een sterk geërodeerd terrassenlandschap (figuur 37A) in overeenstemming met Veldkamp & van den Berg (in druk). De berekende netto erosie van circa 40 m in 500 ka wordt getemperd door de zeespiegelfluctuaties. In dwarsdoorsnede (figuur 37B) is de stratigrafische geschiedenis van de terrassen weergegeven op y= 18 km (zie figuur 37A) van het gesimuleerde landschap. In figuur 37C wordt de dynamiek van het systeem door de tijd heen getoond. De wisselwerking tussen verticale tektoniek en zeespiegelfluctuaties blijkt duidelijk uit de onregelmatig stijgende tijdlijn.

Simulatie 2
In tegenstelling tot simulatie 1, wordt deze simulatie gekenmerkt door een tektonische daling van 0,01 m/ka. Het gesimuleerde landschap na 500 ka simulatie vertoont een flauw hellend reliëf dat stroomopwaarts steiler wordt (figuur 38A). In een doorsnede voor y = 18 km (figuur 38B) is in vergelijking met de voorgaande simulatie een simpele opeenvolging van lagen ontstaan. De dynamische veranderingen door de tijd (figuur 38C) laat een initieel snelle aanpassing van het systeem zien met relatief grootschalige netto erosie, gevolgd door een evenwichtstoestand met sedimentatie en weinig erosie.

2.5.3 Nadere beschouwing van het proces subglaciale erosie

Inleiding
Tijdens verscheidene Pleistocene ijstijden bedekte uitgestrekte landijskappen grote delen van de Noordzee en continentaal West-Europa. Hun invloed op de ondergrond was enorm, en wellicht de meest spectaculaire waren de zeer diep (meerdere honderden meters) ingesneden geulen uit het Elsterien. In deze studie worden zij subglaciaal gevormde diepe depressies genoemd. De meeste subglaciaal gevormde diepe depressies hebben een aantal karakteristieken gemeen: hun voorkomen in uitsluitend ongeconsolideerde sedimenten; hun vervlechtend patroon; hun oriëntatie parallel aan de ijsstroomrichting; het optreden van drempels in longitudinale richting; hun breedte overwegend minder dan 5 km; hun complexe dwarsdoorsnede; hun

Geometrische variabele	Bereik	Klassebreedte
Diepte	50-400 m	50 m
Breedte	1-10 km	0,5 km
Onderlinge afstand	9-13 km	5 km
Lengte	≤ 200 km	50 km

Tabel 7
Het bereik en de klassebreedten van de geometrische variabelen die voor de subglaciaal gevormde diepe depressies uit het Elsterien zijn onderscheiden.

opvulling van smeltwater- en meerafzettingen.

Aangezien subglaciaal gevormde diepe depressies door hun grote diepte een potentiële invloed op de stabiliteit van zoutstructuren kunnen hebben, is in deze studie aandacht besteed aan: een meer gedetailleerde analyse van de subglaciaal gevormde diepe depressies; een beschrijving van de fysische processen van subglaciale erosie die tot subglaciaal gevormde diepe depressies kunnen leiden gebaseerd op een procesmorfologische analyse van subglaciaal gevormde diepe depressies uit de literatuur; een mogelijk verband tussen maximale erosiediepte en opbouw van de ondergrond.

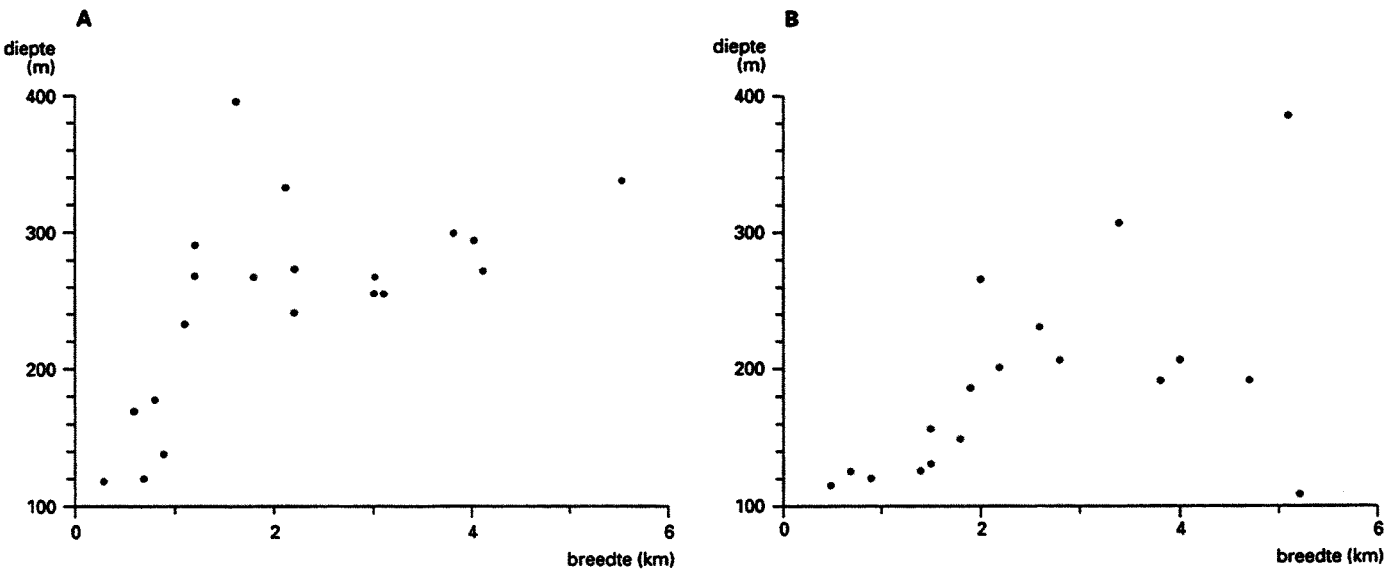
Algemene kenmerken van subglaciaal gevormde diepe depressies

Verspreiding en ouderdom: Behalve één lokatie aan de amerikaanse oostkust (Boyd et al., 1988), zijn subglaciaal gevormde diepe depressies alleen bekend uit de ondergrond van Noordwest-Europa in een brede zone vanaf de Engelse oostkust, via Noord-Nederland en Noord-Duitsland en hun continentale shelf, tot aan een onbepaalde zone aan de Poolse grens. Van alle ijstijden is de Elsterien ijstijd gekenmerkt door de grootste verbreiding van subglaciaal gevormde diepe depressie.

Geometrie: Uit boorinformatie en seismische profielen (b.v. Küster & Meyer, 1979; Bosch, 1991; Cameron et al., 1986) zijn een aantal algemene geometrische kenmerken of variabelen te herleiden waarvan de bereiken zijn weergegeven in tabel 7.

Zowel individueel als onderling vertonen subglaciaal gevormde diepe depressies grote variaties in diepte waarbij veelvuldig drempels optreden. Uitgediepte delen zijn niet te relateren aan begin of einde van subglaciaal gevormde diepe depressies. Figuur 39 toont twee diagrammen waarin de diepte van subglaciaal gevormde diepe depressie tegen de breedte is uitgezet; een diagram heeft betrekking op een kleigebied en de andere op een zandgebied. Subglaciaal gevormde diepe depressies kunnen enkelvoudig of samengesteld zijn, in het laatste geval mogelijk als gevolg van meerdere afzonderlijke erosiegebeurtenissen binnen een subglaciaal gevormde diepe depressie (Ehlers, 1990).
Lengte is een moeilijk te definiëren parameter aangezien deze afhankelijk is van het gehanteerde dieptecriterium. Voor deze studie is de lengte van de subglaciaal gevormde diepe depressie bepaald volgens de 100 m -NAP/NN dieptecontourlijn.

Patronen: De hoofdrichting van subglaciaal gevormde diepe depressies is ongeveer N-Z, parallel aan de belangrijkste ijsstroomrichtingen. Er zijn echter enkele gevallen in Noord-Duitsland bekend van een afwijkende richting (O-W)



Figuur 39
Diagrammen waarin de diepte van de subglaciaal gevormde diepe depressies uitgezet is tegen de breedte. A. Kleigebied, B. Zandgebied.

gerelateerd aan het voorkomen van zoutstructuren in de ondergrond. Volgens Ter Wee (1979) is een vergelijkbaar voorbeeld in Noord-Nederland bij Beilen bekend.

Sedimentaire opvulling: Globaal bestaat de opvulling van een subglaciaal gevormde diepe depressie uit de volgende eenheden (van onder naar boven): smeltwaterafzettingen; glacio-lacustriene afzettingen; deltaïsche smeltwater-afzettingen. Smeltwater- en glacio-lacustriene afzettingen kunnen elkaar herhaaldelijk afwisselen (Ehlers & Linke, 1989; Ehlers, 1990). Op verschillende diepten kunnen bovendien gemengde afzettingen voorkomen die op grondmorenen zouden kunnen duiden. Het lijkt niet aannemelijk dat er een verband bestaat tussen de vorming en de opvulling van de subglaciaal gevormde diepe depressies, daar er vermoedelijk een groot tijdsverschil bestaat tussen het optreden van beide processen. De meest waarschijnlijke interpretatie is de vorming van een subglaciaal gevormde diepe depressie door subglaciale erosie met daaropvolgend de afzetting van smeltwater- en meerafzettingen.

Interpretatie van statistische gegevens

De meetwaarden van de verschillende parameters zijn statistisch bewerkt met behulp van zogenaamde parameter vrije toetsen (Mann-Whitney rangensomtoets; Kolmogrov-Smirnov gelijkvormigheidstoets) om de significantie te onderzoeken van het verschil tussen meetwaarden van een geometrische variabele in een klei- of in een zandgebied. De volgende conclusies worden getrokken:

Diepte: Voor subglaciaal gevormde diepe depressies in Nedersaksen en de Noordzee geldt dat de gemeten diepten in klei- en zandgebieden een significant verschil in verdeling vertonen. In het kleigebied zijn de depressies gemiddeld dieper dan in het zandgebied.

Breedte: Breedtemetingen aan subglaciaal gevormde diepe depressies in heel Noordwest-Europa komen uit dezelfde populatieverdeling. Geologisch gezien, lijken de breedten van subglaciaal gevormde diepe depressies dus onafhankelijk van de grondsoort waarin subglaciaal gevormde diepe depressies aangetroffen zijn.

Onderlinge afstand en lengte: Verschillen in gemeten onderlinge afstanden voor de verschillende grondsoorten zijn niet significant. Waarden voor de lengte van subglaciaal gevormde diepe depressies zijn te spaarzaam voor gebruik van statistische toetsen.

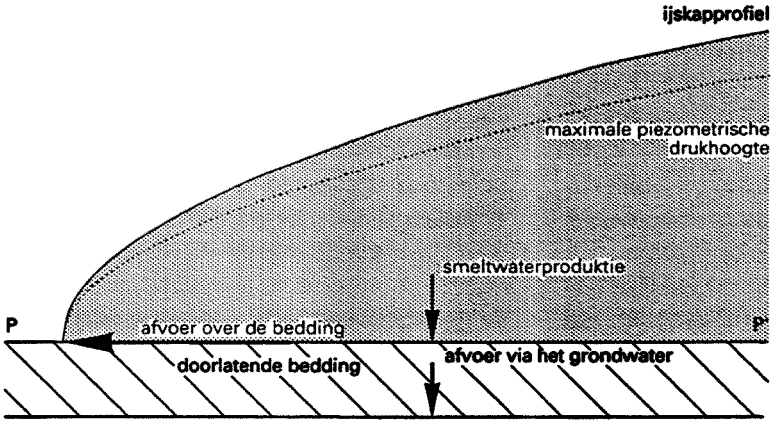
Afgezien van de diepte van de diepe depressies, is statistisch geen relatie aangetoond tussen de geometrie van subglaciaal gevormde diepe depressies dieper dan 100 m en de lithologische eigenschappen van de grondsoort aan het oppervlak vlak voor de Elsterien landijsbedekking.
Enkele kanttekeningen hierbij zijn:
- Subglaciaal gevormde diepe depressies ondieper dan 100 m zijn niet statistisch bewerkt.
- Er is geen diepte-/diktecriterium van de dominante grondsoort aan het paleo-oppervlak vastgesteld.
- De dichtheid van de steekproef op de gebruikte kaarten is gering.
- De betrouwbaarheid van de kaarten is niet onderzocht; dit geldt vooral voor de breedte variabele. De onderlinge afstand tussen de depressies is de meest betrouwbare variabele.

Mechanismen en parameters voor de vorming van de diepe depressies

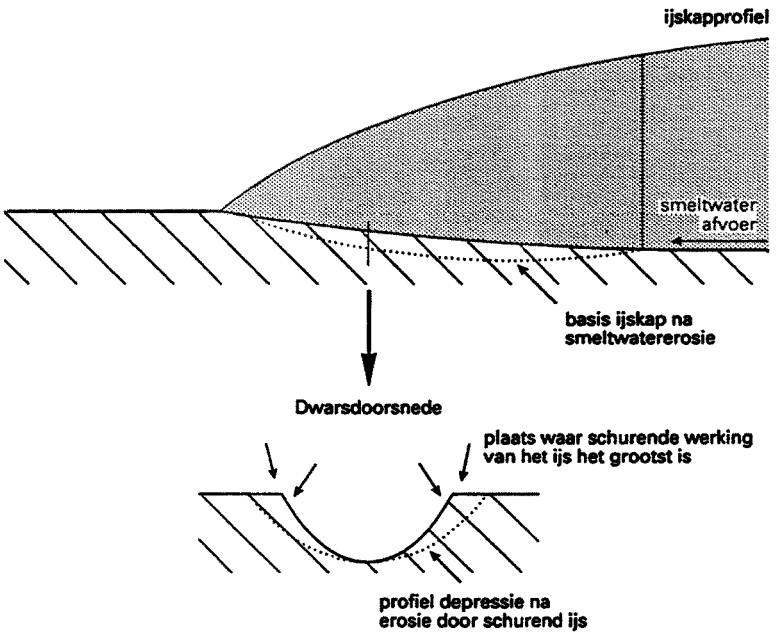
Er bestaan nog grote onzekerheden over het ontstaan van subglaciaal gevormde diepe depressies. Het verband tussen de geometrie en een mogelijke ontstaanswijze is tot op heden alleen gebruikt om een kwalitatief oordeel te geven over de orde van grootte van de intensiteit van het vormende proces. Uit de literatuur zijn twee mogelijke processen af te leiden die tot de vorming van subglaciaal gevormde diepe depressies hebben kunnen leiden, namelijk erosie door subglaciaal smeltwater en glaciale kinematische erosie.
Erosie door subglaciaal smeltwater is het resultaat van de erosieve kracht van water dat onder een ijskap stroomt. De stroomsnelheid wordt bepaald door de subglaciale waterdrukgradiënt. Voorbeelden van erosie door subglaciaal smeltwater zijn tunneldalen (Nye, 1953; Wright, 1973) en jökulhlaups (Nye, 1976). Erosie door subglaciaal smeltwater is een veel voorkomend fenomeen onder ijskappen.
Glaciale kinematische erosie is het resultaat van de erosieve kracht van een glijdende gletsjer of landijskap. Voorbeelden van glaciale kinematische erosie zijn fjorden en gletsjerdalen).

Figuur 40
Schematische voorstelling van de wijze waarop smeltwater wordt afgavoerd onder een ijskap (A) en smeltwater en bewegend ijs de ondergrond eroderen(B). C. Schematisch bovenaanzicht van het gemodelleerde systeem.

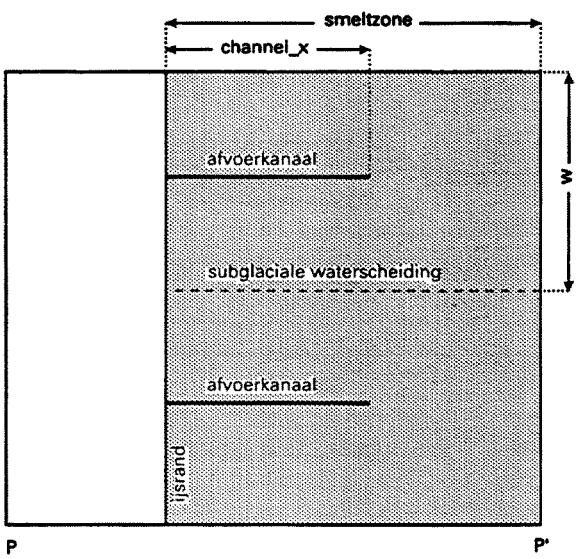
A. Lengteprofiel



B. Lengteprofiel



C. Bovenaanzicht



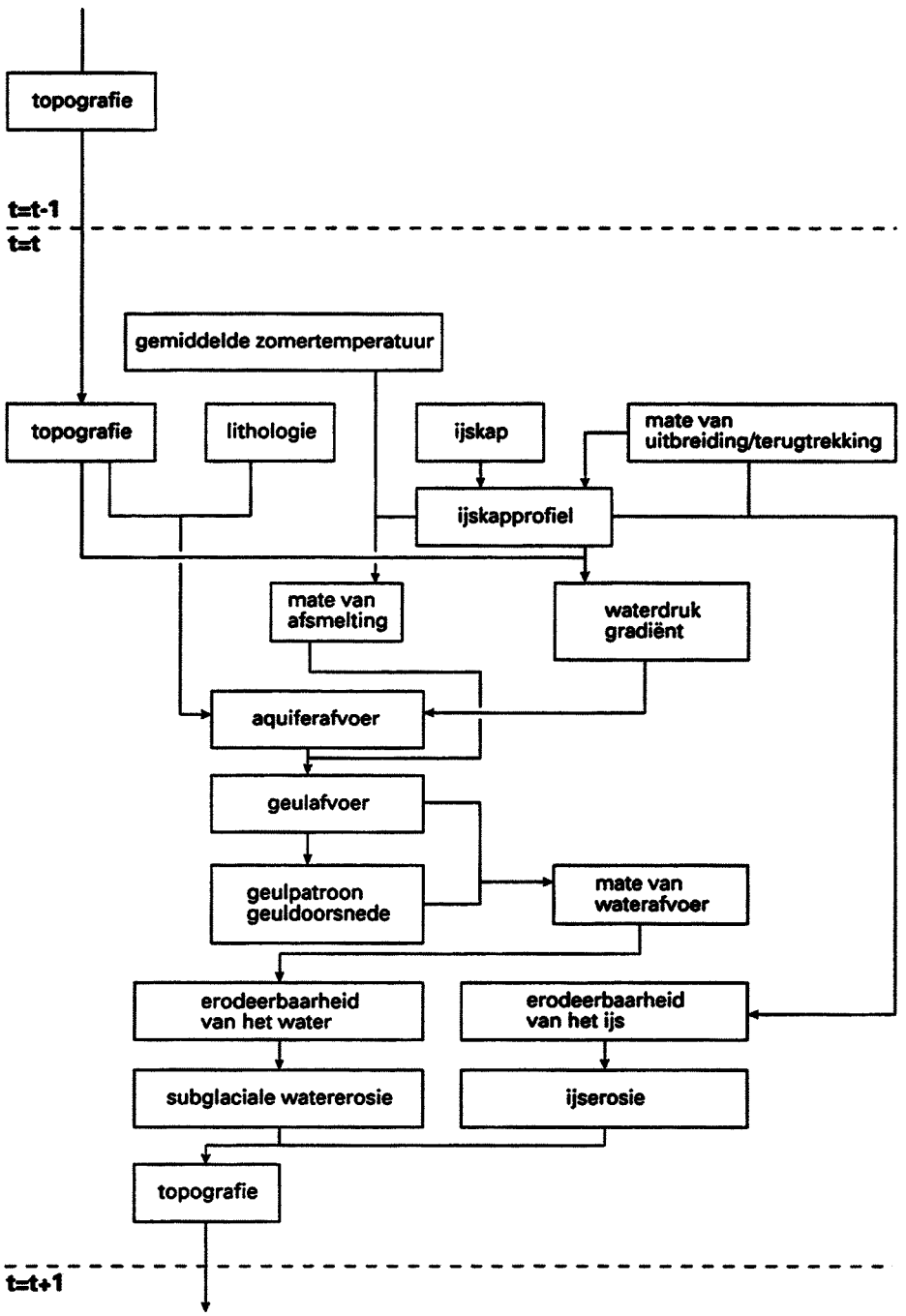
Fossiele voorbeelden zijn glaciale bekkens uit het Saalien en Weichselien van Noordwest-Europa. In subglaciaal gevormde diepe depressies worden bovendien glacio-tektonische verschijnselen waargenomen (Linke & Ehlers, 1987; Ehlers & Linke, 1989; Bruns, 1989; Ehlers, 1990).

Volgens verschillende auteurs is het waarschijnlijk dat een combinatie van beide processen een rol heeft gespeeld bij de vorming van subglaciaal gevormde diepe depressies (Grube, 1979; Küster & Meyer, 1979; Liedtke, 1981; Ehlers, 1990; Jeffery, 1991).

Parameters bij erosie door subglaciaal smeltwater

Erosie door smeltwater is afhankelijk van het evenwicht tussen krachten die het sediment losmaken en vervoeren en krachten in het sediment die tegen erosie weerstand bieden. De volgende parameters bepalen het volume en de wijze van smeltwaterafvoer:

De thermische eigenschappen van de ijskap: Deze worden bepaald door de gemiddelde jaarlijkse luchttemperatuur aan het ijsoppervlak, de dikte van de ijskap, de accumulatiesnelheid,



Figuur 41
Stroomdiagram van het model SUBGLER.

de reologische eigenschappen van het ijs, en de geothermische warmteflux (Paterson, 1981).

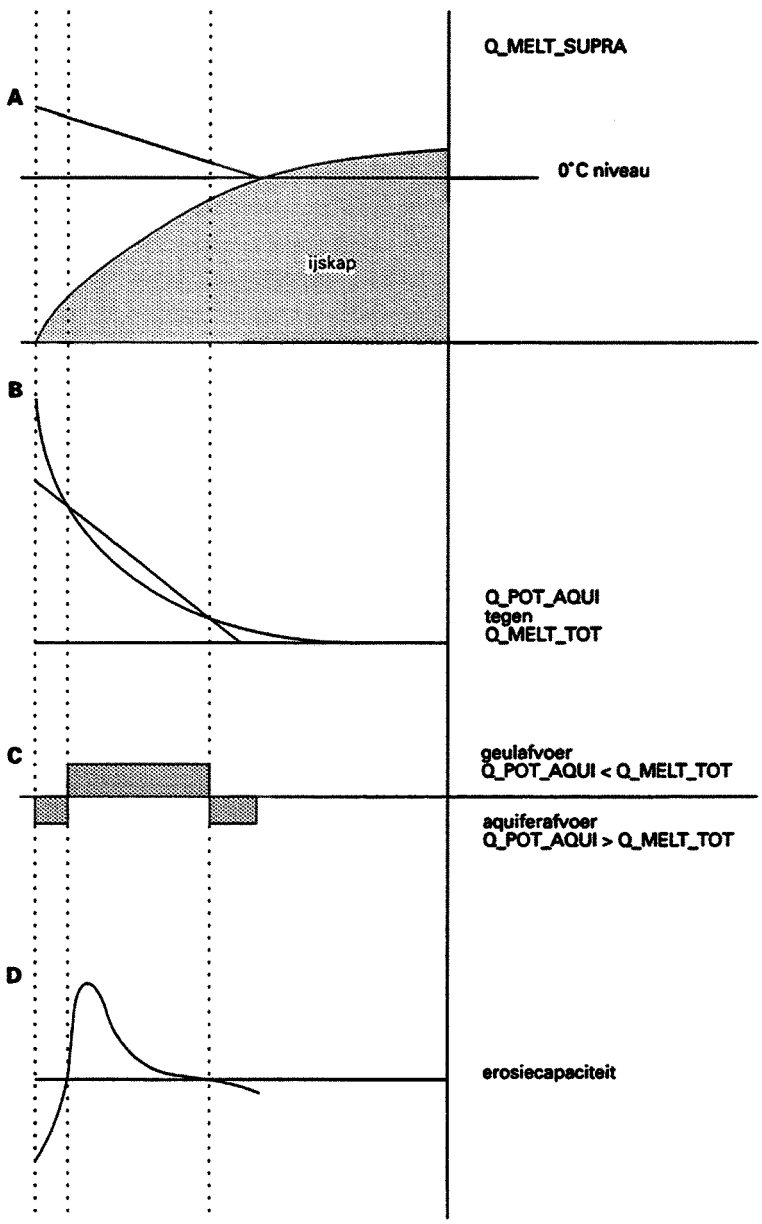
De doorlatendheid en dikte van de gletsjerbedding: Een goed doorlatende bedding met een grote dikte zal een beperkte productie van smeltwater via het grondwater kunnen afvoeren (Boulton & Hindmarsh, 1987; Shoemaker, 1986; Alley, 1989). Indien de productie de afvoer via het grondwater overtreft, worden afvoerkanalen onder de ijskap gevormd (figuur 40).

Parameters bij glaciale kinematische erosie

Bij een lage effectieve druk (het verschil tussen de druk als gevolg van het gewicht van de ijsmassa en de poriënwaterdruk) wordt beddingmateriaal in het basale ijs opgenomen (Boulton, 1974). Dit gebeurt bij voorkeur aan de randen van de afvoerkanalen (figuur 40).

Modellen voor de vorming van de diepe depressies

Het catastrofe model: In dit model is de erosieve kracht voornamelijk afkomstig van water dat onder hoge druk naar de ijsrand stroomt. Het probleem bij dergelijke catastrofe modellen (b.v. Wingfield, 1990) is de noodzaak van enorme hoeveelheden smeltwater die in korte tijd vrij moeten komen om subglaciaal gevormde diepe depressies te vormen. Bovendien moet dit voor elke nieuwe subglaciaal gevormde diepe depressie opnieuw gebeuren. Het is totaal



Figuur 42
Schematische weergave van de modelberekeningen. A. Doorsnede door de ijskap met positie van de 0 °C isotherm en de productie van smeltwater op de ijskap (Q_MELT_SUPRA); B. Functies van de potentiële afvoercapaciteit van de ondergrond (Q_POT_AQUI) en de totale productie van smeltwater (Q_MELT_TOT); C. Zones met afvoer door watervoerende laag en met (aanvullende) afvoer door geul; D. Functie van erosiecapaciteit.

onduidelijk waarom dit zich in het bijzonder tijdens het Elsterien op grote schaal zou hebben afgespeeld, en niet tijdens het Saalien of het Weichselien.

Het "steady-state" model: Volgens Boulton & Hindmarsh (1987) wordt volumetoename van een subglaciaal afvoerkanaal door smelten van het ijs vervangen door volumetoename van een afvoerkanaal door erosie van de bedding. Het probleem bij dit model is vooral de veronderstelde deformatie van de sedimenten in de bedding. Dit wordt overigens niet geconstateerd in (seismische) dwarsdoorsneden.
Als alternatief kan verondersteld worden dat in plaats van deformatie, erosie door smeltwater (verticale insnijding en 'bank' erosie) analoog aan fluviatiele processen, optreedt. Als gevolg van fluctuerende smeltwaterafvoer, wisselen erosie door smeltwater en kinematische erosie elkaar in de tijd af. Laterale geulmigratie zou de relatief grote breedte van de subglaciaal gevormde diepe depressies kunnen verklaren.

De voorkeur in deze studie gaat uit naar het "steady-state" model van Boulton & Hindmarsh (1987), uitgebreid met erosie door subglaciaal smeltwater (zie ook paragraaf 2.5.4).

2.5.4 Modelmatige benadering van subglaciale erosie

In de modelstudie wordt aangenomen dat voor de vorming van subglaciale diepe depressies zowel erosie door subglaciaal smeltwater als erosie door de ijskap zelf van belang zijn (zie paragraaf 2.5.3). De mathematische vertaling van de processen is zo eenvoudig mogelijk gehouden: Erosie door subglaciaal smeltwater zorgt voornamelijk voor de verticale erosiecomponent, glaciale kinematische erosie zorgt voor de verbreding van de eenmaal ontstane depressies. De modelstudie heeft zich in eerste instantie vooral gericht op de verticale erosie door subglaciaal smeltwater.
In het kader van deze studie is het model SUBGLER ontwikkeld. Het twee dimensionale SUBGLER model is geheel numeriek en gebaseerd op sterk vereenvoudigde fysische relaties uit de glaciologische literatuur. Het beschrijft mogelijke erosie door smeltwater in een afvoerkanaal aan de basis van een grote ijskap (figuren 41 & 42). SUBGLER is dan ook alleen geschikt voor continentale ijskappen. De gebruikte tijdstapgrootte is één jaar.

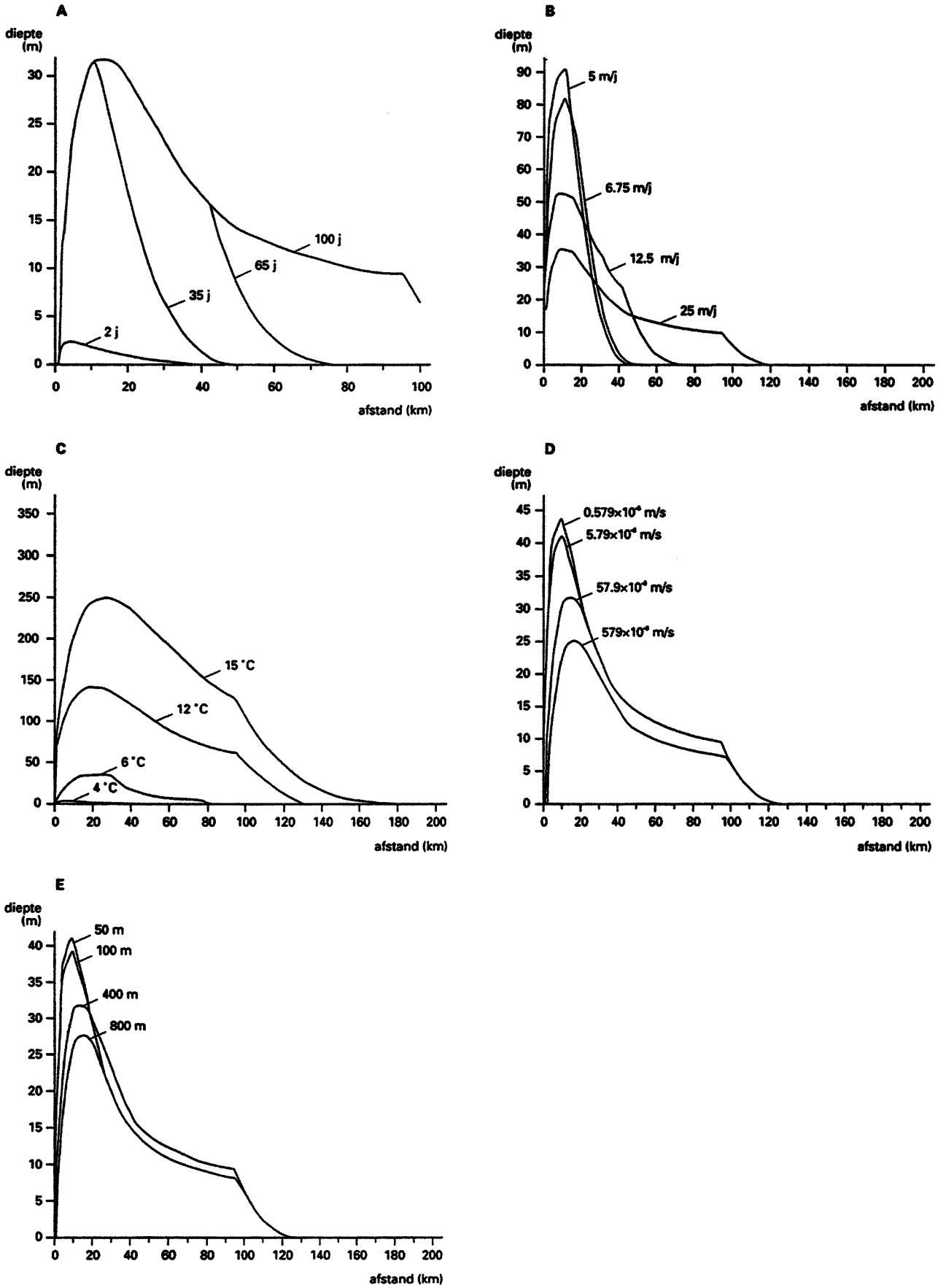
Klimaat	
Profielconstante[1]:	4,7 $m^{-0.5}$
Terugtrekkingssnelheid ijsfront:	25 m/jaar
Gemiddelde zomertemperatuur:	6 °C
Reliëf	
Onderlinge afstand kanalen:	10.000 m
Aquifer	
Doorlatendheid:	0,0000579 m/s
Dikte:	400 m
IJskap	
Smeltsnelheid aan de basis:	$3{,}17 \cdot 10^{-10}$ m/s
Lengte smeltzone:	400.000 m
Max. hoeveelheid smeltwater:	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s

Tabel 8
Invoerwaarden van SUBGLER simulaties; [1] deze term wordt onder het kopje "Klimaat" verklaard.

Het model gaat uit van een grote, homogene ijskap op een vlakke, homogene ondergrond. Smeltwater wordt zowel aan de basis als aan de top van de ijskap geproduceerd en wordt zoveel mogelijk door de ondergrond (aquifer) afgevoerd. Bij oververzadiging van de aquifer, vindt drainage plaats over de bedding door smeltwater kanalen. De smeltwater kanalen lopen parallel en op gelijke onderlinge afstand van elkaar, en staan loodrecht op een recht ijsfront.

Enkele algemene aannames zijn:
- De ijskap is homogeen, zonder interne wateropslag of waterstroom beperking.
- Dikte en doorlatendheid van de aquifer zijn constant.
- Drainage van smeltwater door subglaciale kanalen is continue.
- De onderlinge afstand van de kanalen is overal gelijk.
- Al het supraglaciale smeltwater wordt naar de bedding afgevoerd.

Het model hanteert drie input variabelen: reliëf karakteristieken (hoogten en onderlinge afstand van de afvoerkanalen onder het ijs); aquifer karakteristieken (doorlatendheid en dikte); en klimaat (gemiddelde zomertemperatuur, profielkarakteristieken en bewegingssnelheid van het ijsfront). Een basisprobleem bij de modelinvoer is echter de grote moeilijkheid om realistische



Figuur 43
Lengteprofiel van de erosiediepte in een subglaciaal afvoerkanaal bij: A. een profielconstante van 4,7 op de tijdstappen t=2, t=35, t=65 en t=100 jaar; B. verschillende terugtrekkingssnelheden van het ijsfront; C. verschillende gemiddelde zomertemperaturen; D. verschillende doorlatendheden van de aquifer; E. verschillende dikten van de aquifer.

waarden te vinden in de beschikbare literatuur. De gebruikte invoerwaarden staan in tabel 8.

De uitvoer bestaat uit een data file met de ijskap karakteristieken en de reliëf karakteristieken. Het lengteprofiel van het reliëf laat duidelijk het potentiële erosie effect zien (zie figuur 43).

Ondanks het nogal voorlopige en kwalitatieve karakter van SUBGLER en de grote onzekerheid van realistische invoerwaarden, is het mogelijk om enkele simulaties te doen over een periode van 100 jaar en door steeds één van de in tabel 8 weergegeven invoervariabelen te veranderen. De resultaten hiervan worden hierna beschreven. De invloed van klimaat, reliëf en de aquifer zijn voor verschillende parameterwaarden gesimuleerd. De parameters van de ijskap zijn als constant verondersteld.

Klimaat

Figuur 43A toont de profielontwikkeling van een subglaciaal afvoerkanaal door de tijd heen, bij een profielconstante van 4,7 $m^{-0.5}$ (dit is een constante die maatgevend is voor de verhouding van de lengte en de dikte van de ijskap, afhankelijk van de gemiddelde zomertemperatuur). Verdieping van het kanaal wordt gevolgd door verlenging vanaf t=35 jaar.
Uit de simulaties blijkt dat er bij een prograderend ijsfront nauwelijks subglaciale erosie optreedt. Diepere subglaciale erosie door smeltwater in afvoerkanalen treedt echter wel op wanneer het ijsfront zich terugtrekt. Figuur 43B toont het effect van verschillende terugtrekkingssnelheden waarbij opvalt dat hoe sneller de terugtrekking hoe minder diep de erosie.
Het effect van wisselende gemiddelde zomertemperaturen wordt getoond in figuur 43C. Hogere zomertemperaturen veroorzaken potentieel meer erosie door de grotere supraglaciale smeltwaterproductie.
Uit bovengenoemde simulaties dat verschillende parameters een tegengesteld effect hebben op de erosiediepte van de smeltwater afvoerkanalen. Een snelle terugtrekking van het ijsfront werkt averechts op het effect van hogere gemiddelde zomertemperaturen of een hogere smeltwaterproductie. Diepe subglaciale erosie zal dan ook bij voorkeur optreden wanneer verschillende parameters niet tegelijkertijd optreden. Bovendien, mocht een ijsfront na terugtrekking alsnog weer gaan uitbreiden, dan kunnen de subglaciaal gevormde depressies wellicht als aangrijpingspunt dienen voor de vorming van glaciale bekkens en of stuwwallen.

Reliëf

Het effect van verandering in de reliëfparameters is tweeledig. Er is een directe terugkoppeling met de ijsdynamiek waardoor erosie in het afvoerkanaal indirect wordt beïnvloed, en er is effect op de ruimtelijke verspreiding van de afvoerkanalen. Hoe dichter de afvoerkanalen bij elkaar liggen, hoe minder afvoer per kanaal plaatsvindt en dus hoe minder erosie er in een kanaal optreedt.

Aquifer

Figuren 43D en 43E toont het effect van verschillende doorlatendheden en aquiferdikten. Hoe doorlatender en dikker de aquifer, hoe minder water er beschikbaar is voor afvoer door de kanalen, en hoe minder erosie daar zal plaatsvinden.

2.5.5 Conclusies en aanbevelingen

Fluviatiele erosie

1. Bij een riviergradiënt van 20 tot 25 cm/km is de maximale erosiediepte in Nederland ongeveer 20 m. Steilere gradiënten verminderen de erosiediepte. De maximale erosiediepte lijkt onafhankelijk te zijn van de beschouwde ijstijd.
2. Het eerste deel van een klimaatcyclus (van warm naar koud) wordt gekenmerkt door lage sedimentatiesnelheden (ongeveer 10 cm/ka). Het tweede deel van de klimaatcyclus (van koud naar warm) wordt gekenmerkt door hoge sedimentatiesnelheden (ongeveer 30 cm/ka onder gematigd koude condities; ongeveer 80 cm/ka onder strenge koude condities). De gebieden onder invloed van zeespiegelstijging aan het begin van een interglaciaal worden gekenmerkt door sterk afnemende sedimentatiesnelheden (van ongeveer 1000 cm/ka tot 0).
3. Het FLUVER model toont aan dat verticale fluviatiele erosie voornamelijk door zeespiegelfluctuaties en tektonische bewegingen wordt beïnvloed.
4. In de Nederlandse tektonische configuratie toont FLUVER aan dat de maximale fluviatiele erosie door zeespiegelfluctuaties ongeveer 10 tot 20 m bedraagt. De maximaal bekende tektonische opheffing over een periode van 500 ka zal echter resulteren in insnijdingen van meerdere tientallen meters.
5. Indien de toekomstige verticale tektonische

bewegingen in Nederland niet zullen verschillen van die tijdens het Kwartair, dan zal fluviatiele erosie slechts een marginaal effect op de stabiliteit van zoutstructuren hebben.

Subglaciale erosie

6. Op basis van waarnemingen aan subglaciale depressies uit het Elsterien in Nederland, het Nederlandse deel van het Continentale Plat en in Noord-Duitsland lijkt er een relatie te bestaan tussen de diepte van subglaciale depressies en de algemene samenstelling van de ondiepe ondergrond. In een kleiige ondergrond lijken diepere geulen te worden aangetroffen dan in een ondergrond die uit zand bestaat.
7. Erosie door subglaciaal smeltwater speelt een belangrijke rol bij de genese van subparallelle patronen van geulvormige depressies. Glaciale kinematische erosie zoals in het "steady-state" model van Boulton & Hindmarsh uit 1987, speelt ook een rol. Het is echter zeer moeilijk om de verhouding tussen erosie door subglaciaal smeltwater en glaciale kinematische erosie vast te stellen. Deze kennis is echter van groot belang om de genese van subglaciaal gevormde diepe depressies te bepalen en betrouwbare simulaties voor de toekomst te kunnen uitvoeren.
8. Statistische analyse van de gebruikte dataset toont, afgezien van de diepte van de diepe depressies, geen significant verschil tussen subglaciaal gevormde diepe depressies in klei- en in zandgebieden. De kwaliteit van de dataset behoeft echter verbetering.
9. Op basis van de huidige kennis van de genese van subglaciaal gevormde diepe depressies en de relatie met de opbouw van de ondergrond lijkt vorming van subglaciaal gevormde diepe depressies in de toekomst mogelijk. Het is echter noodzakelijk om ook andere parameters dan lithologie bij het onderzoek te betrekken.
10. Uit simulaties met het in het kader van deze studie ontwikkelde model SUBGLER, blijkt dat subglaciale erosie sterk beïnvloed wordt door klimaatfactoren zoals gemiddelde zomertemperatuur, terugtrekkingsnelheid van het ijsfront, en het ijskapprofiel. De lithologie van de ondergrond speelt slechts een ondergeschikte rol bij de vorming van subglaciale erosie.
11. Het model SUBGLER lijkt de mogelijkheid van geleidelijke subglaciale erosie in afvoerkanalen te bevestigen. Het model is nog niet in staat om de maximale erosiediepte te bepalen.
12. De huidige kennis omtrent het mechanisme van subglaciale erosie en de benodigde invoervariabelen is nog onvoldoende voor een gedegen kwalitatieve en kwantitatieve simulatie.

Aanbevelingen

1. Om tot meer betrouwbare simulaties van toekomstige subglaciale geulvorming en hun potentieel effect op de stabiliteit van zoutvoorkomens te komen, dient de geometrie van Nederlandse subglaciaal gevormde diepe depressies in méér detail te worden bestudeerd. Ondiepe seismiek op land zou belangrijke informatie kunnen opleveren omtrent de relatieve ouderdom en de genese van subglaciaal gevormde diepe depressies. Structurele kenmerken zoals ijs-tektonische vervormingen, fluviatiele erosie en sedimentatie processen, kunnen verzameld worden door middel van gerichte boringen in en om de subglaciaal gevormde diepe depressies.
2. Het ontwikkelde subglaciale erosiemodel kan op de volgende wijze worden verbeterd: verhoging van de kwaliteit van de aannames, koppeling aan globale ijskapmodellen welke de ijsfront bewegingen in de tijd simuleren, interpolatie-afstanden in het bestaande 2D-model flexibeler maken, een aantal nieuwe effecten en relaties inbouwen (isostasie, compactie, complexe opbouw van de ondergrond) en het opwaarderen naar een 3D-model.

Referenties

Alley, R.B. (1989). Water-pressure coupling of sliding and bed deformation: 1. Water System. Journal of Glaciology, vol. 35 (119), p. 108-118.

Berg, M.W. van den (1988). Toelichting op de geomorfologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad 59, 60, 61, 62. Staring Centrum/ Rijks Geologische Dienst.

Berg, M.W. van den (1990). Morpho-tectonics of the Roer Valley Graben. In: Symposium on the Rhine-Rhône rift system. ICL-WG-3 ECRIS Project, University of Basel.

Berg, M.W. van den & J.C.G. Schwan (in press). Climo-tectonic control on fluvial dynamics over the past 150 ka. An example of the river Maas in the southern Netherlands.

Bosch, J.H.A. (1990). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Assen West (12 W) en Blad Assen Oost (12 O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 188 p.

Boulton, G.S. (1974). Processes and Patterns of glacial erosion. In: D.R. Coates, D.R. (red.). Glacial Geomorphology, p. 41-87.

Boulton, G.S. & R.C.A. Hindmarsh (1987). Sediment deformation beneath glaciers: Rheology and geological consequences. Journal of Geophysical Research, vol. 92 (B9), p. 9059-9082.

Boyd, R., D.B. Scott & M. Douma (1988). Glacial tunnel valleys and Quaternary history of the outer Scotian shelf. Nature, vol. 333, p. 61-64.

Bruns, J. (1989). Stress indicators adjacent to burried channels of Elsterian age in North-Germany. Journal of Quaternary Science, vol. 4 (3), p. 267-272.

Cameron, T.D.J., C. Laban, C.S. Mesdag & R.T.E. Schüttenhelm (1984). Indefatigable, Kaartblad 53°N-02°E met toelichting, Quaternary geology. Scale 1:250.000. BGS & RGD.

Ehlers, J. (1990). Untersuchungen zür Morphodynamik der Vereisungen Norddeutschlands unter Berücksichtigung benachbarter Gebiete. In: Bremer beitrage zür Geographie und Raumplanung, Heft 19, Universität Bremen.

Ehlers, J. & G. Linke (1989). The origin of deep buried channels of Elsterian age in Northwest Germany. Journal of Quaternary Science, vol. 4 (3), p. 255-265.

Felder, W.M. & P.J. Bosch (1989). Geologische kaart van Zuid-Limburg en omgeving. Afzettingen van de Maas. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Fisk, H.N. (1944). Geological investigation of the Alluvial valley of the lower Mississippi River. War Department, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Miss., 78 p.

Fisk, H.N. & E. McFarlane, jr. (1955). Late Quaternary deltaic deposits of the Mississippi River. Geol. Soc. America, Special Paper 62, p. 279-302.

Gans, W. de (1991). Kwartairgeologie van West-Nederland. Grondboor en Hamer, no.5/6, p. 103-114.

Groot, TH.A.M. de, H.A. van Adrichem Boogaert, M.M. Fischer, B. Klijnstra, H.M. van Montfrans, H. Uil, M.W. ter Wee, M.J. van Weperen & J.G. Zandstra (1987). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Heerenveen West (11 W) en Blad Heerenveen Oost (11 O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 251 p.

Grube, F. (1979). Übertiefte Täler im Hamburger Raum. Eiszeitalter und Gegenwart, vol. 29, p. 157-172.

Harland, W.B., R.L. Armstrong, A.V. Cox, L.E. Craig, A.G. Smith & D.G. Smith (1990). A geologic time scale 1989. Cambridge University Press, Cambridge, p. 67-72.

Houghton, J.T., G.J. Jenkins & J.J. Ephraums, eds. (1990). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, 365 p.

Houghton, J.T., B.A. Callander & S.K. Varney (1992). Climate Change 1992: The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, 200 p.

Jeffery, D.H. (1991). Comment on the origin of major incisions. Marine Geology, vol. 96, p. 125-126.

Kukal, Z., ed. (1990). The rate of geological processes. Earth-Science Reviews, vol. 28 (1/3), 284 p.

Küster, H. & K.D. Meyer (1979). Glaziäre Rinnen im mitteleren und nordöstlichen Niedersachsen. Eiszeitalter und Gegenwart, vol. 29, p. 135-156.

Liedtke, H. (1981). Glazial Rinnen und glaziale Tiefrinnen. Bochumer Geographische Arbeiten, vol. 40, p. 7-19.

Linke, G. & J. Ehlers (1987). Elster-Kaltzeit. In: Ehlers, J. (red.): Geologische Karte von Hamburg 1:25.000. Erläuterung zu Blatt N2525 Harburg, p. 37-41.

Nye, J.F. (1953). The flow law of ice from measurements in glacier tunnels, labatory experiments and the Jungfraufirn borehole experiment. Proceedings of the Royal Society, Ser. A, Vol. 219 (1139), p. 477-489.

Nye, J.F. (1976). Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins. Journal of Glaciology, vol. 17 (76), p. 181-207.

Paterson, W.S.B. (1981). The Physics of Glaciers. Pergamon Press, Oxford, 380 p.

Schumm, S.A. (1988). Variability of the fluvial system in space and time. In: T. Rosswall, R.G. Woodmansee, and P.G. Risser (red.). Scales and global change. Scientific committee on problems of the environment (SCOPE), John Wiley & Sons Ltd, p. 225-250.

Shoemaker, E.M. (1986). Subglacial hydrology for an ice sheet resting on a deformable aquifer. Journal of Glaciology, vol. 32 (110), p. 20-29.

Veldkamp, A. (1991). Quaternary river terrace formation in the Allier basin, France. Proefschrift, Wageningen, 172 p.

Veldkamp, A. & M.W. van den Berg (in press). 3-D modelling of Quaternary fluvial dynamics in a climo-tectonic dependent system. A case study of the Maas.

Veldkamp, A. & S.E.J.W. Vermeulen (1989). River

terrace formation, modelling, and 3-D graphical simulation. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 14, p. 641-654.
Verbraeck, A. (1984). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Tiel West (39 W) en Blad Tiel Oost (39 O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 335 p.
Warrick, R.A., E.M. Barrow & T.M.L. Wigley, (red., 1990). The Greenhouse Effect and its implications for the European Community. Commission of the European Communities, Directorate-General Telecommunications, Information Industries and Innovation, Luxembourg, 32 p.
Wee, M.W. ter (1979). Geologische Kaart van Nederland, schaal 1:50.000, Kaartblad Emmen (17 West en Oost) met toelichting. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
Wingfield, R. (1990). The origin of major incisions within the Pleistocene deposits of the North Sea. Marine Geology, vol. 91, p. 31-52.
Wright, H.E. jr. (1973). Tunnel valleys, glacial surges and subglacial hydrology of the Superior Lobe, Minesota. In: R.F. Black, R.P. Goldthwait and H.B. Willman (red.). The Wisconsin Stage. Geological Society of America, Memoir 136, p. 251-276.
Zagwijn, W.H. (1989). The Netherlands during the Tertiary and Quaternary: A case history of Coastal Lowland evolution. In: Geologie en Mijnbouw, vol. 68, p. 107-120.

2.6 Haalbaarheid van de ontwikkeling van een operationeel geologisch barrièremodel

2.6.1 Inleiding

Centraal in het onderzoek binnen het OPLA Programma staat de veiligheidsstudie (VEOS, PROSA), waarin het risico van in zout opgeborgen afval voor de mens en zijn omgeving wordt geanalyseerd. In de veiligheidsstudie wordt een model gebruikt dat de migratie van radionucliden door de opeenvolgende geologische barrières simuleert. De geologische barrières vormen het onderwerp van onderzoek in het OPLA Programma waar de Rijks Geologische Dienst en een aantal andere aardwetenschappelijke onderzoeks-instellingen zich op richten.
Het is de taak van de Rijks Geologische Dienst om de huidige en mogelijk toekomstige toestanden van de geologische barrières te beschrijven. Om tot een goede onderbouwing van de prognoses voor de toekomst te komen, is het noodzakelijk om een goed inzicht te verwerven in de processen die de toekomstige toestand van de geologische barrières kunnen beïnvloeden. De opgebouwde kennis dient geïntegreerd ondergebracht te worden in een geologisch barrièremodel waarmee het gezamenlijke effect van de processen op de geologische barrières gedurende opeenvolgende fasen in de toekomst kan worden voorspeld.

Eén van de afgeleide doelstellingen van het project GEO-1A is de haalbaarheid te onderzoeken van de ontwikkeling van een tijdsafhankelijk geologisch barrièremodel. Dit model is bedoeld voor het voorspellen van de toekomstige natuurlijke ontwikkeling van de geologische barrières in de ondergrond van Noordoost-Nederland op basis van een integrale simulatie van natuurlijke processen die de stabiliteit van de geologische barrières zouden kunnen verstoren of doen verstoren. Aan de hand van dit model zouden kwantitatieve uitspraken gedaan moeten worden over eventuele toekomstige veranderingen van de geologische barrières rond een opslagplaats die gesitueerd is in een zoutvoorkomen in de ondergrond.

Hiervoor is de volgende werkwijze gevolgd (RGD-30.117A, 1991; RGD-30.117B, 1993): Gebruik makend van een aantal vooraf geformuleerde randvoorwaarden, waaraan de ontwikkeling van het barrièremodel zou moeten voldoen en wenselijke karakteristieken van het toekomstig Nederlands geologisch barrièremodel, is een aantal bestaande modellen bestudeerd. Door de evaluatie van ieder model afzonderlijk is nagegaan in hoeverre een model geschikt is om te dienen als basismodel voor het Nederlands geologisch barrièremodel. Dit is gevolgd door een keuze van het meest geschikte bestaande model voor dit doeleinde. Vervolgens is een structuur ontworpen waarbinnen het geselecteerde model, eventueel samenwerkend met andere modellen en additionele program-matuur, de stabiliteit van de geologische barrière kan simuleren. Op basis van deze inzichten is een beoordeling gegeven worden van de hoeveelheid en de aard van de inspanningen die noodzakelijk zijn voor de ontwikkeling van een operationeel Nederlands geologisch barrièremodel. De

haalbaarheid van het modelleren van de verschillende interactieve processen, die de opbergfaciliteit kunnen aantasten, kan hieruit direct worden afgeleid.

2.6.2 Algemene karakteristieken van een Nederlands geologisch barrièremodel

Het te ontwikkelen Nederlands geologisch barrièremodel zal zich bij voorkeur baseren op een reeds bestaand geologisch barrièremodel, dat aangepast en aangevuld zou moeten worden met modules van nog ontbrekende processen, die relevant zijn in de Nederlandse geologische setting. De belangrijkste wenselijke karakteristieken van het toekomstig Nederlands geologisch barrièremodel worden hieronder opgesomd. Deze dienen als referentiekader bij de evaluatie en beoordeling van bestaande modellen.

(Inter)nationale samenwerking
Vanwege de complexiteit van de hier beschreven vraagstelling en de intentie om een reeds bestaand model te gebruiken als basis voor het Nederlandse geologisch barrièremodel wordt gestreefd naar een nauwe samenwerking met nationale en internationale instituten.

Mathematisch-fysische onderbouwing
Een gedegen mathematisch-fysische onderbouwing van de te simuleren processen is een voorwaarde voor het ontwikkelen van een model. Een mathematisch-fysische onderbouwing impliceert dat de mathematische formules en algoritmen in het barrièremodel de fysische werkelijkheid zo correct mogelijk benaderen. Dit houdt in dat de processen die de barrière direct beïnvloeden (diapirisme, subrosie en erosie) fysisch zo realistisch mogelijk worden weergegeven. Indien de werking van deze processen afhankelijk is van andere processen, dan impliceert de mathematisch-fysische onderbouwing dat ook deze indirect beïnvloedende processen zo correct mogelijk in het model gemodelleerd moeten worden. Hieruit volgt dat het mathematisch-fysische criterium de interactieve koppeling van processen voorschrijft. Het is mogelijk dat de hiervoor genoemde indirect beïnvloedende processen hun eigen specifieke tijd- of ruimteschalen kennen, die afwijken van de tijd- en ruimteschalen van de direct beïnvloedende processen. De mathematisch-fysische onderbouwing vereist dan ook simulatie van het indirect beïnvloedende proces op hun eigen tijd- en ruimteschalen. Mathematisch-fysische onderbouwing kan ook simulatie in drie ruimtelijke dimensies en tijdsafhankelijke simulatie impliceren, indien de fysische werkelijkheid dat voorschrijft. De tijdsafhankelijkheid is echter als apart criterium opgevoerd. De feitelijke uitvoering van een zo correct mogelijke mathematisch-fysische onderbouwing kan wel verhinderd worden door gebrekkige deterministische proceskennis, een onvolledige mathematische fundering of beperkingen van de hardware.

Probabilisme of determinisme
Vanwege de hiervoor gestelde eisen aan de mathematisch-fysische onderbouwing van het barrièremodel betekent dat het model sterk deterministisch van aard zal zijn. Niet gemodelleerde of in fysische zin niet begrepen natuurlijke variabiliteit zou daarna probabilistisch ingevuld kunnen worden. De probabilistische simulatietechniek is een methode om de natuurlijke variabiliteit van een proces of parameter door middel van herhaalde trekking uit kansdichtheidfuncties die deze variabiliteit beschrijven, te benaderen.

Tijdsafhankelijkheid
Tijdsafhankelijke modellering van een geologische barrièremodel is een essentieel vereiste. De vele continu actieve en in aard en intensiteit veranderende processen, die de geologische barrières doen veranderen (b.v. erosie/sedimentatie), en hun interacties kunnen namelijk alleen op een accurate mathematisch-fysische wijze gesimuleerd worden, indien ze tijdsafhankelijk gemodelleerd worden. Verder is het belangrijk om te kunnen berekenen gedurende welke tijdstappen bepaalde tijdelijk actieve processen (b.v. subglaciale erosie) geactiveerd worden onder invloed van de geldende omstandigheden. Eventuele aantasting van de opbergplaats is afhankelijk van de toestand van de barrières gedurende een bepaalde tijdstap en van het cumulatieve effect van de verschillende processen die dan actief zijn.

Naast de tijdsafhankelijkheid van processen verandert ook de toxiciteit van het afval als een functie van de tijd. Naarmate de tijd verstrijkt neemt deze globaal gesproken af. In het

onderzoek naar de opberging van radioactief afval worden over lange perioden (tot enkele miljoenen jaren) risicoberekeningen uitgevoerd. De geologische geschiedenis van de aarde laat zien dat de opbouw van de ondergrond in deze tijdspanne ingrijpend kan veranderen.
Zoals gebruikelijk in computermodellen wordt de tijd niet continu weergegeven, maar worden de verschillende procesparameters in discrete tijdstappen berekend. De snelheid van de verschillende processen en de beschikbare computer-rekentijd limiteren de tijdstap en bepalen deels de nauwkeurigheid van de simulatie.

Processen

Teneinde de stabiliteit van de geologische barrières in de toekomst zo correct mogelijk te simuleren, is de modellering van alle mogelijk beïnvloedende processen wenselijk. Daar de fysische werkelijkheid en alle interacties tussen processen in deze fysische werkelijkheid nog niet volledig bekend zijn, is het, naast zuiver praktische redenen, noodzakelijk een selectie te maken van de processen die in het barrière-model opgenomen moeten worden. Voor het doel van dit project is de hierna beschreven selectie van processen gemaakt.

Tijdsafhankelijkheid wordt in het barrièremodel geïntroduceerd door twee hoofdprocessen van exogene en endogene aard. Hier worden ze de primaire tijdsafhankelijke processen genoemd. Aan de exogene zijde betreft het een astrofysisch proces: de variaties in de aardbaan die in belangrijke mate de klimaatveranderingen op de langere termijn (10^3-10^6 jaar) dicteren. Aan de endogene zijde is de warmte-ontwikkeling in de aarde verantwoordelijk voor lang-periodische tektonische processen (actief op een tijdschaal groter dan 10^5 jaar), zoals de beweging van aardschollen, magmatisme, thermisch geïnduceerde regionale verticale bewegingen en de spanningsopbouw in de aardkorst.

Aan de andere kant zijn er processen die de geologische barrières rond de opbergplaats direct kunnen beïnvloeden. Hier worden ze de direct beïnvloedende processen genoemd. Het zijn de processen diapirisme, subrosie en erosie (RGD-30.010, 1990). Diapirisme ontstaat door halokinese (zoutvloei). Subrosie is de oplossing van het zout wanneer het in contact komt met onderverzadigd water. Erosie tenslotte, is het exogene mechanische of chemische proces dat de dikte van het afdekkende laagpakket boven de zoutstructuur kan wijzigen.

De op mondiale schaal werkende primaire tijdsafhankelijke processen kunnen de lokaal actieve direct beïnvloedende processen direct of indirect sturen. Met andere woorden: er is een koppeling aanwezig tussen de primaire tijdsafhankelijke processen en de direct beïnvloedende processen die al dan niet via andere processen verlopen. In het geval van niet directe koppeling zijn er processen aanwijsbaar die als intermediair dienen tussen de primaire tijdsafhankelijke processen en de direct beïnvloedende processen. Hier worden ze de indirect beïnvloedende processen genoemd. Onderkenning en selectie van te modelleren processen uit deze groep is niet eenduidig en verschillen kunnen ontstaan door de fysische werkelijkheid, de tijd- of ruimteschaal of zelfs door de selecteur.

Voor de Nederlandse situatie is een voorlopige selectie van indirect beïnvloedende processen te maken, die in meer of mindere mate een exogeen of endogeen karakter hebben. We noemen de volgende processen. Regionaal klimaat, glaciaties, permafrostontwikkeling, vegetatie-ontwikkeling, oppervlakte hydrologie, zeespiegelbewegingen, kustgenese, verschillende andere vormen van erosie waaronder subglaciale geulvorming, riviererosie, winderosie of duinvorming, compactie, vloeistofstroming, lokaal verticale bewegingen, waaronder isostasie, seismiciteit, breukvorming en plooiing. Sommige van deze processen kunnen overigens ook direct barrières beïnvloeden (zie boven).

De in het barrièremodel aanwezige koppeling van de indirect beïnvloedende processen aan de primaire tijdsafhankelijke processen enerzijds en de direct beïnvloedende processen anderzijds, maar ook de onderlinge koppelingen van de indirect beïnvloedende processen zouden sterk moeten lijken op datgene wat de fysische werkelijkheid voorschrijft.

Daar deze fysische werkelijkheid zeer complex, zelfs deels onbekend is en de capaciteiten van de computer hardware gelimiteerd zijn, ontkomt men niet aan een verregaande vereenvoudiging. Deze vereenvoudiging kan bestaan uit het moedwillig weglaten van (onderdelen van)

processen of het moedwillig weglaten van koppelingen. Voor het barrièremodel voor de Nederlandse geologische setting moet geanalyseerd worden in welke mate deze onvermijdelijke vereenvoudigingen de kwaliteit van de simulaties verminderen en tot een aanvaardbaar laag niveau zouden kunnen terugbrengen.

Samenvattend: Een Nederlands geologisch barrièremodel zou moeten voldoen aan vijf algemene voorwaarden, te weten: 1. (inter)nationale samenwerking, 2. een gedegen mathematisch-fysisch onderbouwing 3. een gezonde verdeling tussen de beschrijving en modellering van (onderdelen van) processen op een deterministische dan wel probabilistische wijze, 4. tijdsafhankelijke modellering en 5. alle mogelijk beïnvloedende processen moeten gesimuleerd kunnen worden. Voor de evaluatie van bestaande modellen, die gebruikt kunnen worden als basis voor een Nederlands geologisch barrièremodel zijn de argumenten genoemd onder punt 2., 3. en 4. meestal van doorslaggevende betekenis. Wanneer een bestaand model op deze punten aangepast zou moeten worden aan de hier gestelde gewenste karakteristieken, dan betekent dit over het algemeen een totale herstructurering en herprogrammering van dit model. Het inpassen van ontbrekende processen hoeft daarentegen niet tot dergelijk ingrijpende veranderingen van het basismodel te leiden als de interactie van deze processen met reeds ingebouwde processen niet al te hecht is.

2.6.3 Beschrijving en evaluatie van bestaande modellen

De eigenschappen en capaciteiten van een zestal bestaande geologische barrièremodellen of barrière-achtige modellen zijn getoetst aan het in de voorgaande paragraaf geschetste referentiekader. Deze modellen zijn GSM, FFSM, CASTOR, TIME4, SEDPAK en SEDSIM. In een aantal gevallen zijn deze ontworpen door buitenlandse instituten met het doel de geologische barrières rond een ondergrondse opbergplaats voor afval te simuleren. De meest geschikte modellen zijn aan tests onderworpen om hun bruikbaarheid nader te kunnen analyseren.

GSM

GSM (Geologic Simulation Model) is een probabilistisch model, geschreven in FORTRAN 77, en ontwikkeld door INTERA tot 1983 (INTERA-ONWI 447, 1983). Het modelleert de geologische evolutie van een opberglokatie in het Pasco Basin (Colombia Plateau) tot enkele miljoenen jaren in de toekomst. De simulatie van de verschillende mogelijk verstorende processen en fenomenen baseert zich op (vele) kansverdelingen (probability density functions, pdf's), die door de gebruiker bepaald moeten worden. De simulatie richt zich voornamelijk op de veranderingen van de permeabiliteit in een verticaal profiel (de 'model cross-section') door het Pasco Bekken. Met behulp van deze bepaling van de permeabiliteit kunnen veranderingen in de patronen van grondwaterstroming worden bepaald. De 'model cross-section' is daarvoor in een aantal compartimenten verdeeld.

In GSM worden elf processen onderscheiden die elk in aparte submodellen worden doorgerekend. GSM rekent deze processen sequentieel uit. Eerst wordt de 'undetected features module' aangeroepen, dan de 'climate module' en dan alle overige submodellen in willekeurige volgorde met uitzondering van de 'hydrologic processes module' welke altijd als laatste aangeroepen wordt. De overige submodellen heten: continental glaciation, magmatic events, deformation, sea-level fluctuation, geomorphic events, meteorite impact, sub-basalt faulting en shaft seal failure.

De bruikbaarheid van het model GSM voor de Nederlandse situatie blijkt uit een toetsing met eerder genoemde randvoorwaarden en karakteristieken gering te zijn. Dit wordt vooral veroorzaakt door het lokatiespecifieke karakter van GSM, waardoor het pas na zeer ingrijpende wijzigingen bruikbaar te maken is voor de Nederlandse situatie. Tevens lijkt het probabilistische karakter van GSM eerder een nadeel dan een voordeel, veroorzaakt door specifieke en moeilijk te vervullen wensen betreffende de benodigde data in het model GSM. Ook is nadelig dat de ontwikkeling van GSM, voor zover bekend, na 1983 is gestopt.

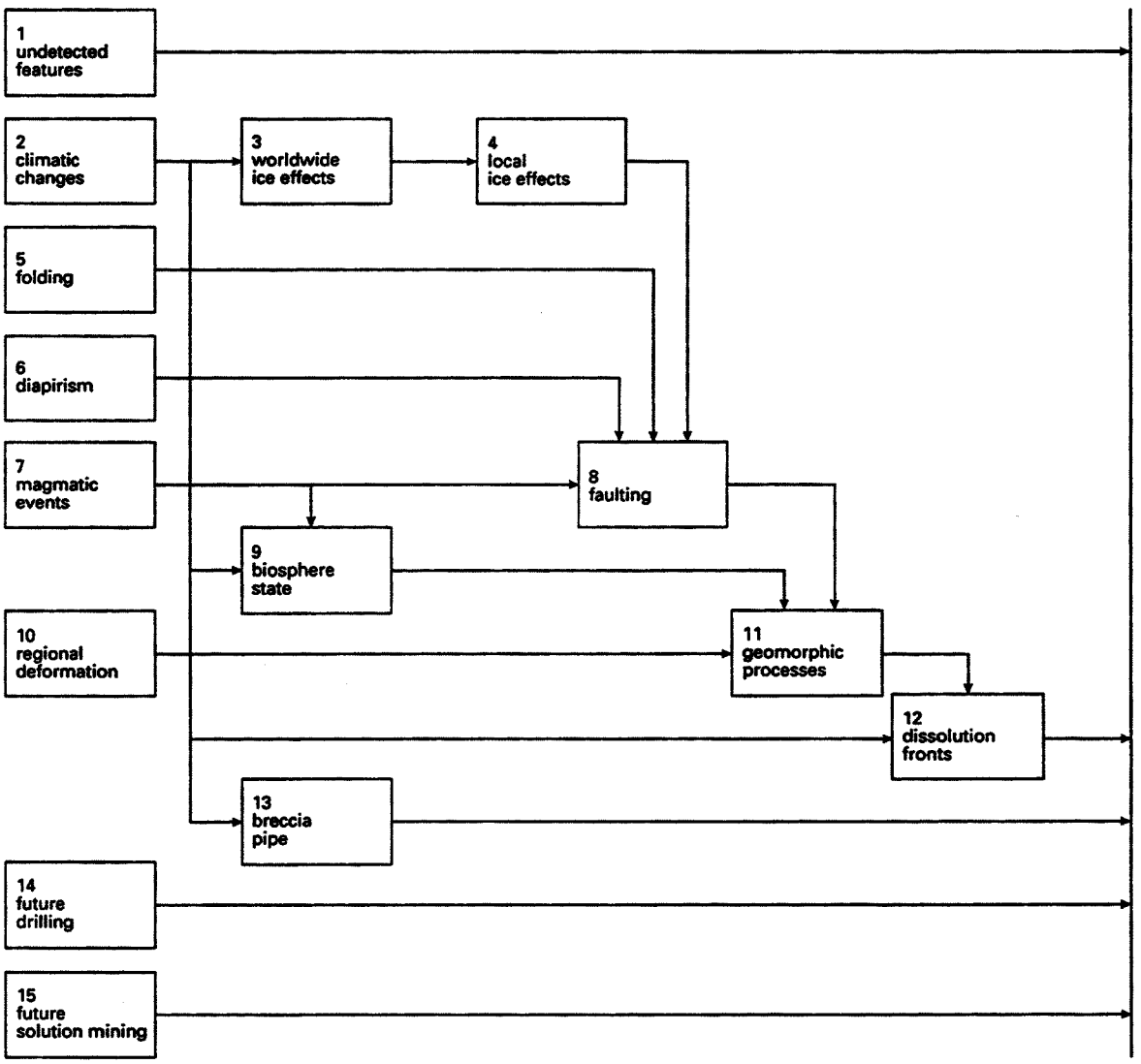
FFSM

FFSM (Far Field State Model) is een probabilistisch rekenmodel, geschreven in FORTRAN 77,

voor de simulatie van veranderingen rond een opbergplaats van hoog radioactief afval. Het is tot en met 1983 ontwikkeld door INTERA, waarbij GSM gebruikt is als basis (INTERA - ONWI 436, 1983). Van het GSM model bleef alleen de algemene methodiek over, de codering van het FFSM model is geheel nieuw.

FFSM is een generiek geologisch simulatiemodel dat de te verwachten geologische ontwikkeling van een willekeurige opbergplaats en directe omgeving tot maximaal enkele miljoenen jaren in de toekomst voorspelt. De opbergplaats zelf heeft geen invloed op die ontwikkeling (far field). Wel wordt rekening gehouden met cumulatieve effecten van, en effecten van de interactie tussen, verschillende processen en fenomenen (figuur 44). Daarentegen is het gebruik van scenario's ook mogelijk. De simulatie van de stabiliteit in het onderzoeksgebied gebeurt echter uitsluitend voor een aantal door de gebruiker opgegeven lokaties (referentiepunten).

FFSM kan een flink aantal geologische processen en fenomenen simuleren, maar ze hoeven niet alle actief te zijn rond een opbergplaats; het optreden van de verschillende processen en fenomenen rond de opbergplaats wordt in belangrijke mate probabilistisch gestuurd. De simulatie van die processen en fenomenen gebeurt in submodellen waarvan de namen hierna gegeven zijn: undetected features, climate, worldwide glaciation, local glaciation, folding, salt diapirism, magmatic events, faulting,



Figuur 44
De structuur van het FFSM model (INTERNA ONWI 436, 1983). De blokken representeren de verschillende submodellen. De Engelse naam van elk submodel staat in deze blokken. De nummering geeft tijdstap de volgende van aanroep voor elk submodel.

biosphere state, regional deformation, geomorphic processes, dissolution front, breccia pipe, solution mining en future drilling.

Met het model FFSM is binnen dit project een op Nederland gerichte praktijktoets uitgevoerd.

FFSM heeft een aantal belangrijke voordelen. 1. Het model is tijdsafhankelijk door sturing van exogene en endogene krachten. Helaas lijkt deze sturing een weinig fysisch karakter te hebben. 2. FFSM is bruikbaar voor een willekeurige opbergplaats. 3. Veel van de mogelijk relevante processen voor de Nederlandse situatie zijn al in FFSM betrokken.

Echter, het model FFSM kent ook belangrijke nadelen. 1. Ondanks de simulatie van exogene als endogene processen, lijkt het een en ander toch vooral in dienst te staan van de simulatie van het oppervlak van het onderzoeksgebied. 2. FFSM is nooit getest voor een bestaande opberglokatie. Het is waarschijnlijk dat vele, zo niet alle pdf's (kansdichtheidverdelingen) voor serieuze toepassing van FFSM voor de Nederlandse situatie nog aangemaakt moeten worden. 3. Bij de conclusies van GSM zijn in het algemeen de nadelen verwoord die volgen uit het gebruik van pdf's. 4. Nadelig is ook dat de ontwikkeling van FFSM, voor zover bekend, na 1983 is gestopt.

CASTOR

Het is niet zinvol de eigenschappen van CASTOR te beschrijven zonder een beeld te schetsen van de totale modelsequentie, waarvan CASTOR een onderdeel is. Deze modelsequentie bestaat uit GEOPROSPECT, EXPECT en CASTOR.

GEOPROSPECT (Garcin en Courbouleix, 1991a; 1991b) is een geavanceerd grafisch pakket, geschreven in TURBO PASCAL 5.5, en werkend op PC's. Het kan Digital Elevation Models (DEM's), of digitale topografische kaarten in bovenaanzicht of in perspectief op het scherm tonen. Verschillende aspecten van deze DEM's kunnen vervolgens worden gewijzigd, maar ook kunnen ze gebruikt worden als invoer voor globaal en/of regionaal werkende scenario's of processen. Te wijzigen aspecten van de DEM's zijn bijvoorbeeld de zeespiegel en de temperatuur. Ook is het mogelijk globale of regionale processen te activeren, zoals het aangroeien van ijskappen.

EXPECT is een expertsysteem, dat BRGM samen met het Laboratoire de recherche informatique (Université Paris XI) ontwikkelt en dat eind 1992 nog niet operationeel is. Dit expertsysteem moet zorgen voor de vertaling van de globale en regionale processen, geactiveerd in GEOPROSPECT, naar lokale veranderingen in het studiegebied. Hierbij moet EXPECT ook rekening kunnen houden met de interactie tussen lokale factoren. Het doel van EXPECT is het aanmaken van realistische kwalitatieve scenario's, die door middel van databases voorzien worden van kwantitatieve data voor de generatie van scenario's die direct door CASTOR verwerkt kunnen worden.

Het model CASTOR (Canceill et al., 1985) is een zeer eenvoudig model dat de consequenties van scenario's, zoals gegenereerd door EXPECT, voor het studiegebied kan bepalen. Op lokale schaal kan CASTOR de geomorfologie van een gebied laten wijzigen veroorzaakt door de lokale expressie van verschillende processen.

De opzet van BRGM om de verschillende functies van een geologisch barrièremodel te splitsen in een drietal los van elkaar opererende modellen lijkt in beginsel gezond. Niet alleen door de deterministische aanpak van het geheel maar ook vanwege de toepassing van zeer moderne technieken (GIS-applicaties, expertsystemen).

TIME4

Het probabilistische model TIME4 (versie 1.1, een op niet belangrijke punten gewijzigde versie 1) is ontwikkeld tussen 1988 en 1990 in opdracht van het Britse Department of the Environment (DOE) door Dames & Moore International (Dames & Moore, 1990). Dit model is gebaseerd op het TIME2 Model van hetzelfde bureau en beide zijn een verdere ontwikkeling van de Amerikaanse modellen GSM en FFSM. Het is geschreven in FORTRAN 77.

Dit TIME4 model simuleert het toekomstige milieu tot 1 miljoen jaar na nu, met tijdstappen van 10.000 jaar, rond een diepe, ondergrondse opbergplaats, op basis van de tijdsafhankelijkheid van het klimaat. Dit aspect wordt door een probabilistische klimaatgenerator gesimuleerd. Het programma bevat een aantal klimaatgestuurde submodellen welke enige processen simuleren waarvan onderzoek heeft aangetoond dat die de grootste effecten zullen geven rond

die ondergrondse opbergplaats. De submodellen waarin die processen gemodelleerd hebben de volgende indicatieve namen: "climate", "glacier", "sea level", "glacial effect", "surface water budget" en het "denudation submodel".

Verdere ontwikkeling van TIME4 wordt nog steeds voortgezet en zou moeten resulteren in versie 2 van het model TIME4. Belangrijke redenen hiervoor waren: 1. Het ontbreken van een marine submodel, waarmee mariene processen gesimuleerd kunnen worden. 2. Noodzakelijke verbetering van de klimaatgenerator. Tijdens tests is namelijk gebleken dat na zo'n 30000 jaar, de klimaatgenerator ophoudt met het genereren van tijdsafhankelijke uitvoer. Echter de aanvulling met submodellen waarmee endogene processen gesimuleerd konden worden, voor de Nederlandse situatie noodzakelijk, was niet gepland.

Belangrijke nadelen en tekortkomingen van TIME4 zijn:
- Door de gebruikte probabilistische technieken was vereenvoudiging van de processen, en daarmee minimalisering van de noodzakelijke computer-rekentijd, noodzakelijk. Na bestudering van de eigenschappen van TIME4 kan geconcludeerd worden dat de vereenvoudiging van de processen, de mathematisch-fysische basis en daarmee de kwaliteit van de resultaten sterk heeft aangetast. Zowel versie 1.1 als versie 2 zullen gebruik maken van probabilistische principes.
- Door de genoemde problemen met de klimaatgenerator is de tijdsafhankelijkheid van TIME4 versie 1.1 niet voldoende gewaarborgd op langere termijn. Aanpassing van de klimaatgenerator is dus noodzakelijk, en is ook gepland voor TIME4 versie 2. In theorie is het mogelijk dat de toekomstige klimaatgenerator van TIME4 versie 2 geschikt is als basis voor de klimaatmodellering in het barrièremodel.
- TIME4 (versie 1.1 en versie 2) houdt niet direct rekening met endogene processen; de beschrijving van de ondergrond ontbreekt geheel. Deze endogene processen zijn voor de Nederlandse situatie waarschijnlijk wel van belang. Verschillende submodellen die endogene processen kunnen simuleren moeten toegevoegd worden. Bij het inbouwen van die endogene submodellen zullen bestaande submodellen die exogene processen simuleren, aangepast moeten worden. Hoogstwaarschijnlijk geldt dit voor alle submodellen, behalve de klimaatgenerator.
- In TIME4 (versie 1.1 en versie 2) zijn de simulaties van glaciaties gebaseerd op 'glacier pictures'. Deze 'glacier pictures', waarin verschillende aspecten van glaciaties tijds- en plaatsafhankelijk worden beschreven, worden bepaald met behulp van de modellen van Boulton en collega's (Boulton, 1984; Boulton et al., 1984; Hindmarsh et al., 1987). Indien het voor de Nederlandse situatie gewenst is, nieuwe 'glacier pictures' te maken dan geeft het model TIME4 op zich geen uitkomst.

TIME4 is volgens de huidige stand van zaken (nog) niet geschikt voor de Nederlandse situatie.

SEDPAK

SEDPAK maakt interactieve computer-simulaties van een willekeurige depositionele setting van regionale omvang. De ontwikkeling van SEDPAK werd gestart in het Gulf Corp. Research Center in Pittsburgh, Pennsylvania. Een eerste werkende versie was gereed in 1987 (Burton, Kendall and Lerche, 1987). Daarna is het werk overgenomen door de universiteit van South Carolina, USA (Strobel et al., 1989). Het model is geschreven in de programmeertaal C en maakt, gezien het grote aantal rekenstappen, de rekensnelheid van een work station noodzakelijk.

In een door de gebruiker opgegeven tweedimensionaal verticaal profiel door een bekken van gedefinieerde omvang simuleert SEDPAK de geometrie van zand-, klei- of carbonaatsedimenten, die laag voor laag het bekken opvullen. De bronnen van klastische afzettingen (dit zijn afzettingen, die hoofdzakelijk bestaan uit produkten van erosie en die over enige afstand zijn getransporteerd). liggen buiten de grenzen van het profiel, of ze zijn het resultaat van erosie van de topografie binnen de grenzen van het profiel. De carbonaten worden *in-situ* in het bekken geproduceerd. De geometrie van de gesedimenteerde lagen wordt bepaald door de beschikbare hoeveelheid klastica enerzijds en carbonaten anderzijds. Deze hoeveelheden kunnen per tijdstap verschillen. De lokalisering van de bronnen van klastisch materiaal en de herverdeling van de sedimenten binnen het bekken is ook bepalend voor de geometrie. De initiële en zich evoluerende vorm van het basement, regionale kanteling, verticale breukbewegingen, zeespiegelbewegingen, compactie en isostasie zullen ook de

sedimentaire patronen beïnvloeden.

De submodellen, die processen simuleren in SEDPAK, zijn: sea level, subsidence, faulting, erosion, clastic deposition, carbonate deposition, compaction and isostasy.

Belangrijke delen van de modellering lijken te zijn gebaseerd op (vereenvoudigde) fysische processen, waarmee op zuiver deterministische wijze resultaten verkregen worden. De mathematisch-fysische onderbouwing van het geheel lijkt bevredigend. Wel moeten vele procesparameters door de gebruiker opgegeven worden. Door het ontbreken van primaire tijdsafhankelijke processen is het geheel niet tijdsafhankelijk. Echter door het interactieve karakter kan op kunstmatige wijze tijdsafhankelijkheid geïntroduceerd worden door tussentijdse wijziging van parameterwaarden.

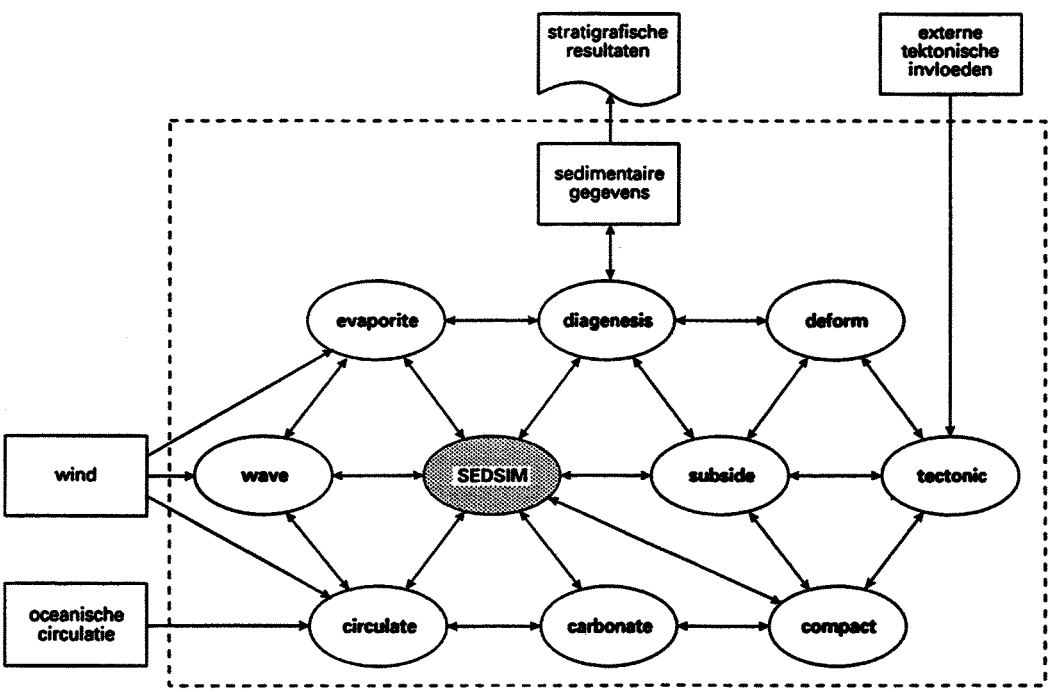
Voor het doel van het onderzoek in het OPLA Programma zal het model aangevuld moeten worden met een klimaatsimulator welke een nog ontbrekend glaciatiemodel kan activeren. Verder zijn submodellen van diapirisme en subrosie noodzakelijk.

SEDSIM

Sinds 1982 wordt aan de Stanford University (Ca) onder leiding van prof. Harbaugh een serie computermodellen ontwikkeld (Tetzlaff & Harbaugh, 1989). Deze computermodellen simuleren elk voor zich een geologisch proces dat belangrijk is bij de vorming en opvulling van sedimentaire bekkens. De modellen houden rekening met de drie ruimtelijke dimensies, de resultaten moeten op mathematisch-fysische wijze verkregen worden en ze moeten op dynamische wijze 3-D grafisch gerepresenteerd kunnen worden. Hiervoor is wel de rekenkracht van een work station noodzakelijk.

Het eerste model uit die serie was SEDSIM, waarnaar later het gehele project genoemd is. SEDSIM is volledig deterministisch maar heeft chaotische karakteristieken: kleine mutaties in de invoer kunnen de resultaten volledig veranderen. Onder het SEDSIM project zijn ook andere modellen ontwikkeld of zijn op dit moment nog in ontwikkeling (figuur 45). In verschillende updates van SEDSIM zijn de geologische processen die in die andere modellen gesimuleerd worden, geïntegreerd in het SEDSIM model.

SEDSIM versie 3 is een quasi 3-D computermodel, geschreven in FORTRAN-77 (ook beschikbaar in C) dat de vloeistofstroming over een topografie bepaalt, gebruik makend van een 2-D representatie van de Navier-Stokes vergelijking. Verder simuleert het de hieruit voortvloeiende transport, erosie en afzetting van materiaal van maximaal vier gemiddelde korrelgroottes in een fluvio-deltaïsche setting.



Figuur 45
Een weergave van de totale structuur van SEDSIM en verwante modellen (ovalen) uit 1989 (Tetzlaff & Harbaugh, 1989). Het model SEDSIM simuleert transport, erosie en sedimentatie door rivieren. De functie van de andere modellen is weergegeven in de ovalen. De blokken representeren verschillende groepen invoerparameters. De gehele SEDSIM structuur zal resultaten in de vorm van stratigrafische kolommen of profielen genereren. SEDSIM versie 3, gereed gekomen in het najaar van 1992, incorporeert veel van de hier geschematiseerde functionaliteit.

Verdere capaciteiten van de SEDSIM versie 3 zijn: 1. absolute zeespiegelvariatie; 2. kustnabije transport, erosie en afzetting van klastische sedimenten; 3. erosie van steile hellingen; 4. compactie van sedimenten; 5. isostatische reacties veroorzaakt door de sedimentlast; 6. additionele regionale daling, zowel differentieel als flexureel. Versie 3 kan verder gekoppeld worden aan een model voor vloeistofstroming in de ondergrond. Dit proces wordt in toekomstige versies waarschijnlijk direct geïntegreerd.

De concepten van het SEDSIM project lijken vrij nauw aan te sluiten op wat nuttig lijkt voor de Nederlandse situatie. Een belangrijke eigenschap is de goede mathematisch-fysische onderbouwing. De hieruit voortvloeiende deterministische karakteristieken zorgen ervoor dat de resultaten van een simulatie direct te interpreteren zijn. Een andere gunstige eigenschap van SEDSIM is de onafhankelijkheid van de ruimtelijke en tijdschaal. Het is gebleken dat de maximale simulatietijd, naast de hardware, ook afhankelijk is van de gewenste resolutie en tijdstappen, waarbij zeker een simulatietijd van 100.000 jaar en mogelijk 1 miljoen jaar gehaald moet kunnen worden. Tevens is belangrijk dat in ruime mate aandacht geschonken wordt aan de weergave van de resultaten. Daarbij komt dat participatie in het SEDSIM project mogelijk lijkt. In het geval van samenwerking zullen de modellen en alle onderzoeksresultaten tegen betaling van "abonnementskosten" beschikbaar zijn.

Tekortkomingen van SEDSIM in de huidige staat zijn: Door het ontbreken van primaire tijdsafhankelijke processen (zoals het klimaat of het spanningsveld) krijgt de beschreven versie van SEDSIM niet een directe tijdsafhankelijke sturing. Door geforceerde tussentijdse verandering van invoerparameters is een zekere tijdsafhankelijkheid te introduceren, wat gebleken is uit de "Alameda Creek" simulatie (Kolterman & Gorelick, 1992). Het lijkt dus mogelijk tijdsafhankelijkheid te introduceren door een koppeling van primaire tijdsafhankelijke submodellen met SEDSIM. Voor de Nederlandse situatie dient nog het nodige aan het model toegevoegd te worden. Modellen voor diapirisme en subrosie ontbreken tot nu toe volledig en zijn, voor zover bekend, ook niet in de planning opgenomen. Dit geldt ook voor glaciatiemodellen en modellen voor glaciale processen. Mogelijkheden voor de koppeling van deze modellen aan SEDSIM zijn in het kader van deze haalbaarheidsstudie afgetast maar moeten nog nader uitgewerkt worden.

Met een praktijktoets van SEDSIM in dit project is aangetoond dat het model op acceptabele wijze functioneert.

2.6.4 Haalbaarheid van de ontwikkeling van een operationeel geologisch barrièremodel

Karakteristieken

Kort samenvattend omvatte de haalbaarheidsstudie de volgende onderdelen: de bestudering van verschillende bestaande geologische modellen, contacten met derden waaronder de ontwikkelaars van CASTOR, TIME4, SEDPAK en SEDSIM, onderzoek naar de mathematisch-fysische onderbouwing van processen, studies aangaande de eigenschappen van hard- en software en modelleringstechnieken en, niet in de laatste plaats, het in de praktijk toetsen van de capaciteiten van FFSM en SEDSIM. Op basis van het uitgevoerde onderzoek zijn de contouren zichtbaar geworden van een optimaal en praktisch haalbaar geologisch barrièremodel. Een onderdeel daarvan zal het model SEDSIM zijn, dat de beste afspiegeling vormt van het in paragraaf 2.6.2 geschetste referentiekader. Hieronder zijn enkele karakteristieken van het Nederlands geologisch barrièremodel opgesomd.

Processen: Behalve de processen die de stabiliteit van zoutstructuren direct beïnvloeden (diapirisme, subrosie en erosie), en de primaire tijdsafhankelijke processen klimaat (inclusief de astronomische sturing), en de endogene warmtehuishouding, de motor van de mondiaal werkende tektonische processen, is het essentieel dat ook indirect beïnvloedende processen gemodelleerd worden. Tevens zou, waar mogelijk, de plaatsafhankelijke waarden van enige gesteente-eigenschappen ook moeten worden gesimuleerd.

Mathematisch-fysische onderbouwing: In het geschetste referentiekader (paragraaf 2.6.2) is uiteengezet dat een gedegen fysische onderbouwing wenselijk is. Deze fysische onderbouwing zou bij voorkeur bestaan uit primaire fysische wetten boven empirisch verkregen wetmatigheden. In de praktijk zal het echter noodzakelijk zijn empirische wetmatig-

heden herhaaldelijk te gebruiken, omdat de fysische onderbouwing te complex is dan wel ontbreekt.

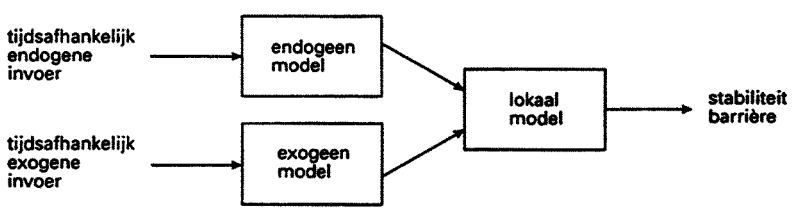
Tijdsafhankelijkheid: Tijdsafhankelijke uitvoer zal worden verkregen door de aansturing van alle gesimuleerde processen door de primaire tijdsafhankelijke processen. Voor de exogene aansturing betreft dit de bekende variaties in de configuratie van de aardbaan, die klimaatsveranderingen aansturen. Indien dit in de toekomst wenselijk blijkt, zal tevens gestreefd worden naar het inbouwen van een endogene tijdsafhankelijke sturing, die gedicteerd wordt door de warmtehuishouding van de gehele aarde.

Determinisme: Teneinde optimaal te voldoen aan de vraag naar een mathematisch-fysisch onderbouwd geologisch barrièremodel zal de modellering van de geologische barrière gestart moeten worden met deterministische principes. De additionele toepassing van probabilisme is niet uit te sluiten.

Ruimteschaal: De verschillende submodellen van het geologisch barrièremodel zullen elk moeten opereren op hun meest ideale ruimteschaal. Interactieve koppeling tussen processen opererend op identieke ruimteschalen moet zoveel mogelijk gegarandeerd worden door werkelijke integratie van de processen. Interactie tussen processen die op verschillende ruimteschalen werken zal het beste gerealiseerd kunnen worden door een toelevering van data in de richting van de modellen van de meer lokale processen. Dit impliceert dat de processen, die op een grotere ruimteschaal werken, vooral functioneren als generator van randvoorwaarden van de meer lokale modellen. Hierdoor lijkt een koppeling van regionale aan lokale modellen onvermijdelijk.

Tijdschaal: Een ander aspect is de tijdschaal. De tijdschaal bepaalt welke processen belangrijk worden voor de simulatie van de stabiliteit van de opbergplaats. Wanneer er in het geologisch barrièremodel uitsluitend rekening gehouden wordt met exogene aansturing van processen, dan lijkt een simulatieperiode van 100.000 jaar het maximum haalbare voor een correcte simulatie. Endogene processen zullen zeker relevant worden op een tijdschaal in de orde van 10^5-10^6 jaar. Voor een model dat zowel exogeen als endogeen aangestuurd wordt lijkt een simulatieperiode tot 100.000 jaar te kort. Een reden om de simulatieperiode niet langer dan 10^6 jaar te laten zijn, is de verminderde betrouwbaarheid van klimaatvoorspellingen op deze tijdschaal. Een andere reden zou kunnen zijn dat de stralingsintensiteit van het kernafval na 1 miljoen jaar al sterk afgenomen is.

Dimensies: Mathematisch-fysisch onderbouwde modellering impliceert de simulatie in drie dimensies van de geologische barrière. Om verschillende redenen zou het echter noodzakelijk kunnen zijn dat er gemodelleerd wordt in twee dimensies. Wanneer processimulatie invloed heeft op de geometrie en/of de eigenschappen van het gesteente, is het belangrijk dat één van de gesimuleerde dimensies de verticale as vertegenwoordigt. Anderzijds zijn er ook submodellen noodzakelijk, die uitsluitend aspec-



Figuur 46
Een schematische weergave van het te ontwikkelen Nederlandse barrièremodel MOTTO. Het model MOTTO bestaat uit een drietal samenwerkende componenten (blokken), elk bestaande uit meerdere submodellen. Deze submodellen zijn niet weergegeven. De functie van elke component is beschreven in het blok. De werking van het endogeen model en het exogeen model krijgt tijdsafhankelijke karakteristieken door tijdsafhankelijke invoer. De uitvoer van het lokale model beschrijft de stabiliteit van de barrière.

ten van en aan het aardoppervlak simuleren en die om die reden 2D kunnen zijn. In principe hoeft de onderlinge koppeling van 2D en 3D modellen niet onmogelijk te zijn.

Samenwerking: Het ontwikkelen van een geologisch barrièremodel is arbeidsintensief en zeer kostbaar. Samenwerking met andere instituten in binnen- en buitenland is daarom wenselijk.

Structuur: De meest praktische structuur van het geologisch barrièremodel schrijft een drietal samenwerkende modellen voor (figuur 46):
1. Een lokaal model waarin alle exo- en endogene processen die de geologische barrières kunnen beïnvloeden, ingebouwd zijn. Dit model zal onder meer een eenvoudig grondwaterstromingsmodel bevatten. SEDSIM is het meest geschikt om als basis voor dit model te dienen.
2. Een supralokaal exogeen model, dat de tijdsafhankelijke exogene invoer voor het lokale model levert. Dit model simuleert alle processen, op supralokale schaal actief, die gestuurd worden door mondiale klimaatsveranderingen.
3. Een supralokaal endogeen model, dat de tijdsafhankelijke, endogene invoer voor het lokale model levert. Dit model simuleert alle processen, op supralokale schaal actief, die gestuurd worden door veranderingen in het supraregionale spanningsveld.

De naamgeving: Voorlopig is gekozen voor de naam MOTTO. MOTTO staat voor MOdel voor Toekomstige Tijdsafhankelijke ontwikkeling van de Ondergrond.

Uitvoering

Om het hiervoor geschetste Nederlands geologisch barrièremodel te kunnen ontwikkelen moet het modelleringswerk nog vele jaren voortgezet worden. Als de beslissing tot ontwikkeling van het model positief uitvalt, dan dient bovenstaande structuur in detail uitgewerkt te worden, mede aan de hand van de volgende te ontplooien studies, die de start voor de ontwikkeling van het gehele model zouden moeten vormen:

Studies op mondiale tot supraregionale schaal:
1. De ontwikkeling van een mondiaal exogeen model. Dit mondiale exogene model wordt gestuurd door astronomische parameters en simuleert aspecten van het mondiale klimaat en waterhuishouding. Mogelijke basismodellen hiervoor zijn General Circulation Models (GCM) en glaciatiemodellen.
2. De ontwikkeling van een supraregionaal endogeen model. Dit supraregionaal model moet de toekomstige spanningstoestand van het westelijke deel van de Euro-Aziatische Plaat kunnen simuleren.

Modellen op regionale schaal:
3. De verzameling van kennis over de topografie, de ondergrond en zijn gesteente-eigenschappen op regionale schaal ten behoeve van andere regionale studies.
4. De ontwikkeling van een model dat het toekomstig debiet en de sedimentlast van belangrijke rivieren kan simuleren met behulp van uitvoer van het mondiale exogene model, gebruik makend van de studie genoemd bij punt 3.
5. De ontwikkeling van een permafrostmodel, dat gekoppeld kan worden aan het mondiale exogene model, gebruik makend van de uitkomsten van de studie genoemd bij punt 3.
6. De verdere ontwikkeling van het subglaciale geulenmodel dat gekoppeld zal worden aan het mondiale exogene model en mogelijk gebruik maakt van de uitkomsten van de studie genoemd bij punt 3.
7. Het verkrijgen van inzichten aangaande toekomstige patronen van regionale grondwaterstroming die kunnen dienen als randvoorwaarden voor lokale grondwaterstromingsberekeningen.
8. De ontwikkeling van een model, dat verticale tektonische bewegingen kan simuleren. Hiervoor wordt het gekoppeld aan het supraregionale endogene model.

Studies op lokale schaal:
9. De ontwikkeling van een gesteente-eigenschappen model dat tijdsafhankelijke aspecten van deze gesteente-eigenschappen zou kunnen simuleren. Dit model zal waarschijnlijk als intermediair tussen verschillende lokaal werkende processen gesitueerd zijn. Indien mogelijk zal het als onderdeel van SEDSIM functioneren.
10. Een algemene aanpassing van het model SEDSIM zodat het geschikt wordt voor de Nederlandse situatie. Het betreft vooral het verrichten van voorwerk dat noodzakelijk is voor uitbreiding met ontbrekende modulen.

11. Het verwerven van een uitgebreid inzicht in en eventuele modellering van kustontwikkeling. Ook deze simulaties zouden gestuurd moeten worden door het supraregionale exogene model. Een belangrijk deel van deze processen is reeds ingebouwd in SEDSIM.
12. Ontwikkeling van een subrosie/diapirisme model dat gekoppeld moet kunnen worden aan SEDSIM.
13. Het verkrijgen van inzichten aangaande lokale verstoringen van het regionale spanningsveld, verkregen uit het supraregionale endogene model door lokaal optredende spanningsbronnen, zoals diapirisme en nabij gelegen landijs.
14. Het verkrijgen van inzichten aangaande seismiciteit van lokaal aanwezige breuken veroorzaakt door het lokale spanningsveld. De resultaten van deze studie zouden het bestaande 'fault simulation submodel' in SEDSIM moeten aansturen.

Verwijzend naar de voorgestelde structuur van MOTTO (figuur 46) zullen de studies onder punt 9, 10, 11, 12, 13 en 14 uitgevoerd moeten worden voor de ontwikkeling van het lokale model, studies 1, 4, 5, en 6 voor de ontwikkeling van het supralokale exogene model en studies 2 en 8 voor het supralokale endogene model. De studies voorgesteld onder punt 3 en 7 en delen van de studies 11, 13 en 14 zijn nevenstudies, die meer inzicht zullen verschaffen aangaande randvoorwaarden en validatie van het lokale model.

Vereisten

Een verantwoorde modellering van de geologische barrières bestaat uit een drietal delen: een processtudie, de eigenlijke modellering en de validatie achteraf. Daarna is een eerste versie van het beoogde model voorhanden. Aan elk van deze delen moet een gelijkwaardig belang gehecht worden. Zowel de processtudie, de ontwikkeling van submodellen, hun onderlinge koppeling als wel de validatie zijn zeer arbeidsintensief en complex van aard. Voor de realisatie van een eerste versie van MOTTO in zijn meest uitgebreide vorm, als boven beschreven, heeft men gedurende enkele jaren de permanente inzet nodig van een groep modelleurs onder leiding van een technisch coördinator en geassisteerd door een programmeur.

Vanwege de hoge complexiteit en uitgebreidheid van de hier beschreven modellen, moeten er ook hoge capaciteitseisen gesteld worden aan de hardware. Voor het geologisch barrièremodel MOTTO, ontwikkeld in zijn meest uitgebreide vorm, wordt geschat dat de continue beschikbaarheid van drie work stations een minimum is.

Om het model MOTTO op betrouwbare wijze te kunnen laten draaien, zijn voldoende lokatiespecifieke gegevens nodig. In hoofdzaak betreft het hier gegevens nodig voor 1. de studie van een aantal processen, 2. de geometrie van de ondergrond, 3. de kennis van gesteenteeigenschappen, 4. de formulering van randvoorwaarden en 5. de validatie van het model. De huidige beschikbare verzameling gegevens is hiervoor ontoereikend.

2.6.5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

1. De modellen GSM, FFSM, CASTOR en TIME4, die alle ontwikkeld zijn ten behoeve van onderzoek voor de opberging van radioactief afval, kwamen niet in voldoende mate tegemoet aan de gewenste karakteristieken van een Nederlands geologisch barrièremodel. Het model FFSM sloot het minst slecht aan bij de vooraf gestelde wensen. Na een praktijktoets viel dit model toch af als basis voor het Nederland geologisch barrièremodel, onder andere omdat het model te beperkt fysisch-mathematisch onderbouwd was.
2. Een ander reeds bestaand type model, dat als basis voor een geologisch barrièremodel zou kunnen fungeren, is het regionale bekkenmodel. Van de twee bestudeerde modellen SEDPAK en SEDSIM, kwam de laatste als meest geschikte model naar voren, onder meer omdat het een gedegen fysisch-mathematische onderbouwing heeft. Een praktijktoets bij IGG-TNO en nauw overleg met de ontwikkelaars van dit model (Stanford University, Ca) bevestigden dit beeld.
3. Voor het Nederlands geologisch barrièremodel MOTTO is een schematische structuur ontworpen. Het bestaat schematisch uit een drietal onderdelen: a. Een lokaal model dat alle processen simuleert die mogelijk kunnen optreden in de nabijheid van de opbergplaats. Het basismodel voor dit lokale model zal waarschijnlijk SEDSIM zijn. De randvoorwaarden van dit lokale model worden door de andere onderdelen bepaald. b. Een supralokaal exogeen model dat op tijdsafhankelijke wijze alle relevante exogene processen kan simuleren. c.

Een supralokaal endogeen model dat een vergelijkbare functie heeft als het voorgaande maar toegespitst is op de endogene processen.

Aanbevelingen

1. Aanbevolen wordt om de ontwikkeling van een operationeel geologisch barrièremodel in een volgende onderzoeksfase te continueren. Aan het eind van een dergelijke fase moet dan een eerste versie van het barrièremodel beschikbaar zijn, welke uitgebreid geverifieerd en gevalideerd kan worden met eventueel beschikbaar gekomen of komende veldgegevens. Om dit geheel te laten slagen dienen de aardwetenschappelijke inspanningen binnen het OPLA Programma in een volgende fase zeer nauw op elkaar afgestemd te worden en zal er ook samenwerking met buitenlandse onderzoeksinstellingen moeten plaatsvinden. De complexiteit en uitgebreidheid van een dergelijk model zal een relatief grote en permanente inzet van gespecialiseerd personeel vergen gedurende enkele jaren. Aan de benodigde hardware moeten ook hoge capaciteitseisen gesteld worden.
2. Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen om het te ontwikkelen geologisch barrièremodel zoveel mogelijk op deterministische grondslag op te zetten, alhoewel additionele modellering volgens probabilistische principes niet geheel buitengesloten zullen en kunnen worden.
3. SEDSIM komt het meest in aanmerking om als basismodel te dienen voor het Nederlands geologisch barrièremodel. Aanpassing van het model SEDSIM alsmede de uitbreiding van het barrièremodel met een supralokaal exogeen en een supralokaal endogeen model is noodzakelijk.
4. Voor de volledige ontwikkeling van een geologisch barrièremodel, dat gebruikt kan worden voor de geologische setting van Nederland, zijn veldgegevens onontbeerlijk. Zij zijn noodzakelijk voor de verificatie van het modelconcept, als invoergegevens voor het model en als toetsingscriteria voor de modeluitkomsten. Het wordt aanbevolen om alle mogelijkheden te onderzoeken, die, binnen de wettelijke kaders en afspraken, de beschikbaarheid van gegevens kunnen vergroten.

Referenties

Boulton, G.S. (1984). Development of a theoretical model of sediment dispersal by ice-sheets. In: Prospecting in areas of glaciated terrain. Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 213-224.

Boulton, G.S., G.D. Smith & L.W. Morland (1984). The reconstruction of former ice sheets and their mass balance characteristics using a non-linearly viscous flow model. Journ. of Glaciology, vol. 30, p. 140-151.

Burton, R., C. Kendall & I. Lerche, (1987). Out of our depth: on the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record. Earth Science Rev., vol. 24, p. 237-277.

Canceill, M., S. Courbouleix, J. Fourniguet, P. Godefroy, Y. Gros, B. Manigault & P. Peaudecerf (1985). Simulation de l'evolution d'un site a l'aide du programme 'CASTOR' In: Etude geoprospective d'un site de stockage, vol 9. Commission de Communautes Europeenes - Sciences et technique nucleaires, EUR 9866FR, 69 p.

Dames & Moore International (1990). Technical reference manual for TIME4 Version 1.0. Technical Report TR-D&M-18.

Garcin, M. & S. Coubouleix (1991a). GEOPROSPECT - maquette d'un outil de géoprospective (janvier 1991). Rapport BRGM R 32138, 32 p.

Garcin, M. & S. Coubouleix (1991b). GEOPROSPECT - maquette d'un outil de géoprospective (nouveaux développements, mars 1991). Rapport BRGM R 32517 GEO SGN, 28 p.

Hindmarsh, R.C.A., L.W. Morland, G.S. Boulton & K. Hutter (1987). The unsteady plain flow of ice sheets: a parabolic problem with two moving boundaries. Geophys & Astrophys. Dyn., vol. 39, p. 183-225.

Intera Environmental Consultants, Inc. (1983). GSM: Geologic Simulation Model for a hypothetical site in the Colombia Plateau - Large Computer Version. ONWI-447.

Intera Environmental Consultants, Inc. (1983). FFSM: Far-Field State Model. ONWI-436.

Kolterman, C.E. & S.M. Gorelick (1992). Paleoclimatic signature in terrestrial flood deposits. Science, vol. 256, p. 1775-1782.

Rijks Geologische Dienst (1990). Aut.: A.F.B. Wildenborg, E.F.J. de Mulder, J.H.A. Bosch, R. Hillen, F. Schokking & K. van Gijssel. Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar. Rapport 30.010.

Rijks Geologische Dienst (1991). Aut.: A. Ruizendaal. Tijdsafhankelijke geologische modellen - Voorlopige literatuurstudie ten behoeve van een te maken keuze. Rapport

nummer 30.117A/TRC4A, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.
Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: A. Ruizendaal, P.J.T. Steins & E.K. Ruijs. Tijdsafhankelijke geologische modellering - Haalbaarheidsstudie. Rapport nummer 30.117B/TRC4B, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.
Strobel, J., R. Cannon, C. Kendall, G. Biswas & J. Bezdek (1989). Interactive (SEDPAK) simulation of clastic and carbonate sediments in shelf to basin settings. Comp & Geosc, vol. 15, p. 1279-1290.
Tetzlaff, D.M. & J.W. Harbaugh (1989) Simulating clastic sedimentation. Van Nostrand Reinhold, New York, 202 p.

2.7 Natuurlijke analogons van radionucliden-migratie

2.7.1 Inleiding

Een van de belangrijkste onderwerpen in het onderzoek naar de mogelijkheden van de opberging van radioactief afval is de migratie van radionucliden door de ondergrond. Voor het berekenen van dit transport zijn grondwater- en geochemische modellen ontwikkeld. Een probleem dat zich hierbij voordoet, is dat er geen praktijktoetsen uitvoerbaar zijn over een periode van 10.000 tot meer dan 1 miljoen jaar. Een uitkomst wordt hier geboden vanuit de geologische discipline, die vele natuurlijke voorbeelden kent waarbij de migratie van radionucliden over lange termijn een rol speelt. Een belangrijk aandachtspunt bij het toepassen van dergelijk voorbeelden voor het onderzoek naar afvalopberging is het aantonen dat het om vergelijkbare (analoge) situaties gaat.

2.7.2 Radionucliden-migratie

Van belang bij de modellering van de migratie van radionucliden in de hydrosfeer rond zoutstructuren zijn zowel de concentraties als de chemische speciatie van deze nucliden in het medium. Speciatie is de chemische vorm waarin een element voorkomt in oplossing. Zowel de speciatie als het gehalte van b.v. uranium in grondwater hangen in hoge mate af van de fysisch-chemische karakteristieken van dat medium: relatieve proporties van de complexerende liganden (dit zijn de delen van organisch-chemische verbindingen die zich aan metalen hechten; $CO3^{2-}$, $PO4^{2-}$, hoog-molaire zuren etc.), de Ph en de Eh.
Uit een viertal case studies vermeld in de rapporten van de Natural Analogue Working Group (Come & Chapman, 1987; 1988; 1990) blijkt dat oxydatie van U (IV) naar U (VI) steeds verantwoordelijk is voor de migratie van uranium. Complexatie van het U (VI) met carbonaat of fosfaat speelt hierbij een intermediaire rol. Fixatie van uranium hangt sterk af van lokale condities en vaak spelen meerdere mechanismen een rol.
Sorptie van uranium aan Fe- en Mn-hydroxiden is een van de belangrijkste mechanismen voor de fixatie van het uranium. Welke secundaire uraanmineralen gevormd worden, hangt met name van de concentratie aan carbonaat en fosfaat in het transportmedium af. Verder is organisch materiaal in het sediment een goede "sink" voor het uranium.

2.7.3 Migratie van uranium uit fosforietknollen: een Nederlands analogon

Door het RIVM is in samenwerking met de RGD, binnen het kader van het OPLA Programma, een onderzoek naar de migratie van uranium uit fosforietknollen voorgesteld (Glasbergen & Wijland, 1990). De fosforietlagen komen met name in de Miocene en Pliocene zanden van West Brabant en Zeeland voor. Deze fosforietknollen zijn zeer compact en bestaan uit lichtgroene glauconietbolletjes en sub-angulaire tot afgeronde kwarts verkit in een bruine apatietmassa (diameter: 0,5 tot 10 cm).
Na afzetting komen de fosforietknollen in contact met het grondwater dat een andere samenstelling en Eh en Ph condities heeft dan het water waaruit de knollen gevormd zijn. Dit zou kunnen leiden tot oplossing of uitloging van de apatiet en het daarin gebonden uranium. In slijpplaatjes en Scanning Electron Microscope (SEM) foto's van de fosforietknollen zijn geen oplossings- of uitlogingsverschijnselen te vinden, wat er op wijst dat er geen oplossing van de fosforietknollen plaatsvindt of plaatsgevonden heeft. Uit de literatuur is bekend dat, indien er migratie van uranium uit fosforietknollen plaatsvindt, er preferent ^{234}U verdwijnt. Uit metingen van de gammastraling blijkt dat er radioactief evenwicht is tussen de verschillende uranium dochters, waaronder ^{234}U in de fosforietknollen. Dit betekent dat er geen selectieve uitloging van de mobiele U dochters uit de fosforietknollen

optreedt dan wel opgetreden is en daarom ook niet van de veel stabielere ^{238}U moederatomen. Uit de metingen van de gammastraling, het onderzoek van de slijpplaatjes en de SEM studies aan de fosforietknollen, volgt dat er géén migratie van uranium uit deze knollen plaatsvindt of plaatsgevonden heeft.
Om deze reden zijn de fosforietknollen uit Zuidwest-Nederland ongeschikt als natuurlijk analogon en is daarom afgezien van de voorgestelde veld- en laboratoriumstudies.

Een mogelijke migratie-analogon in Nederland zou gevonden kunnen worden in uraniumhoudende laagjes in kalken van Zuid-Limburg. Echter, tot dusverre heeft de RGD niet kunnen achterhalen of er hier ook werkelijk migratie heeft plaats gevonden. Een ander mogelijk analogon zou uraniumhoudende pegmatieten in keileem kunnen zijn. Gezien het volume van deze pegmatiet t.o.v. de keileem is het opsporen van *in-situ* liggende pegmatieten bijzonder moeilijk. Bovendien zit de uranium in pegmatieten wederom opgeborgen in stabiele mineralen.

Aanbevolen wordt in een eventuele volgende fase van het OPLA Programma een uitgebreid meetnet rond een zoutstructuur te installeren. Hiermee kunnen de essentiële parameters voor de fixatie van radionucliden worden verkregen (Ph, Eh, fosfaat, carbonaat en organische zuren). Vervolgens kan naar natuurlijke analogons worden gezocht met dezelfde chemische en fysische condities van het grondwater zoals die rond de zoutstructuren werden aangetroffen. Hiermee kunnen dan de opgestelde modellen voor de radionucliden-migratie gevalideerd worden.

Referenties

Come, B. & N.A. Chapman (1987). Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal. CEC Report EUR 11037 EN.

Come, B. & N.A. Chapman (1988, red.). CEC Natural Analogue Working Group, Third Meeting. ECE Report EUR 11725 EN.

Come, B. & N.A. Chapman (1990, red.). CEC Natural Analogue Working Group, Fourth Meeting. ECE Report EUR 13014 EN.

Glasbergen, P. & G.C. Wijland (1990). A Netherlands natural analogue - Uranium-enriched nodules in a brackish sandy aquifer. In: 4th NAWG meeting & Pocos de Caldas project final workshop. Report EUR 13014 EN, p. 233-240.

Harsveldt, H.M., (1973). The discovery of uranium at Haamstede (The Netherlands). Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen., vol. 29, p. 63-72.

2.8 Aspecten van recent onderzoek aan de pijler Gorleben

De Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover voert al vele jaren geologisch en geohydrologisch onderzoek uit aan de pijler Gorleben, de beoogde opbergfaciliteit voor radioactief afval in Duitsland.
Het onderzoek dat momenteel bij de BGR wordt uitgevoerd bestaat deels uit het afronden van onderzoek aan oudere gegevens, verkregen tijdens het verkenningsprogramma in de tachtiger jaren. Hieronder wordt een overzicht gepresenteerd van het onderzoek. Voor meer informatie wordt verwezen naar Bundesamt für Strahlenschutz (1990) en Bornemann (1991).

Hydrologisch onderzoek

In de hydrologische modellen wordt de caprock niet als aquifer meegenomen. Er staan vier filters in deze eenheid, maar men is er niet in geslaagd hieruit watermonsters te nemen. De berekende ^{14}C ouderdommen van het water zijn 5000 jaar voor het bovenste systeem, 10.000 voor het onderste systeem (de Kwartaire geul) en 20.000 jaar in de Lauenburger Ton (Potklei).
De Kwartaire geul, die de zoutpijler Gorleben aansnijdt, maakt deel uit van een globaal N-Z gericht systeem met een lengte van meer dan 100 km. Het diepste deel van dit geulsysteem, ten noordoosten van Gorleben, bedraagt meer dan 475 m onder NN. De grote dikte van de Kwartaire afzettingen naast de structuur weerspiegelen geen randsynclines, maar hangen daar samen met de aanwezigheid van een onderdeel van het geulsysteem.

Onderzoek Onder-Tertiair

Ouderdomsbepaling waren het meest succesvol met behulp van dinoflagellaten. Er werden geen hiaten aangetoond, en derhalve wordt een continu sedimentprofiel aangenomen vanaf het Midden-Paleoceen tot en met Eoceen.

Structureel-geologisch onderzoek ontstaan zoutstructuur

Er is in de geologische geschiedenis circa 437 km^3 in de zoutstructuur gevloeid, waarvan 185 km^3 (43%) nu nog aanwezig is. 57% is in de loop der tijd door oplossing afgevoerd. Bij de berekening van de stijgsnelheden is het zeer belangrijk de depletiegebieden goed af te grenzen, wat uitsluitend kan worden uitgevoerd met behulp van seismiek. Op dieptekaarten van verschillende Tertiaire eenheden lijkt één groot depletiegebied aanwezig te zijn waar meerdere structuren uit geput hebben. Op grond van de seismische karakteristieken van de Zechstein Groep is dit grote gebied echter in meerdere delen op te splitsen. Om een zo nauwkeurig mogelijk beeld te krijgen van de stijgsnelheden is het van belang dat zoveel mogelijk eenheden onderscheiden worden die in detail gereconstrueerd worden. Dit geldt met name voor de afzettingen van de Laat-Trias en Laat-Krijt.

Interne structuur

De Z3 Hoofdanhydriet heeft in de zoutpijler een sterk variërende dikte tussen 30 en 80 m, terwijl volgens de paleogeografie verwacht werd dat de eenheid een continue dikte had. De zoutopeenvolging in de pijler is goed te vergelijken met de ontwikkeling in het gebied van Hannover. De uit zoutmijnen in dit gebied bekende gedetailleerde stratigrafische onderverdeling van de zouten kon met geringe wijzigingen worden toegepast bij de bepaling van de interne structuur van Gorleben. Het opstellen van deze gedetailleerde stratigrafie is vooral van belang bij de ondergrondse verkenning, daar men bij het opbergen van radioactief afval minimaal 50 m van de Hoofdanhydriet, als potentiële aquifer, weg wil blijven. De ontwikkeling van het inzicht in de interne structuur blijkt een bijzonder dynamisch proces te zijn, wat steeds aan vernieuwing onderhevig is. Iedere nieuwe boring draagt weer aanzienlijk bij aan de kennis van de interne structuur.

Onderzoek aan "fluid inclusions"

Naar aanleiding van publikaties over invloeden van het grondwater op steenzout op een diepte van 800 tot 1000 m, is onderzoek verricht aan "fluid inclusions" in de boring Go 1005 door de Universiteit van Clausthal-Zellerfeld. Hierbij werd gekeken naar Na, Mg, Ca, K, Cl, SO_4, Li en Br. Vooral het lithium en broom zijn voor dergelijk onderzoek van groot belang. De uitkomsten hiervan zijn, dat de "fluid inclusions" bestaan uit een hoog geconcentreerde oplossing van $MgCl_2$. De samenstelling van de "fluid inclusions" kwam bijzonder goed overeen met die van een hoog geconcentreerde Zechstein pekel en suggereert de Zechstein ouderdom van de oplossingen. Er is geen enkele aanwijzing gevonden dat het steenzout in aanraking zou zijn gekomen met oppervlaktewater.

Met dezelfde methode is bepaald tot welke diepte de kalizouten zijn beïnvloed door grondwater. In boringen was reeds vastgesteld, dat het Kaliflöz Stassfurt in de zone van de Elsterien-geul op enkele plaatsen direct onder de caprock ligt en dat hier onder invloed van grondwater omzettingen zijn opgetreden (Bornemann & Fischbeck, 1986). Het fluid inclusions onderzoek bevestigde de uitkomst van eerder zoutmineralogisch onderzoek, dat aantoonde dat omzettingen in de kalium-magnesium zouten plaats hebben gevonden tot een diepte van circa 100 m onder de caprock. Voor meer details wordt verwezen naar de publicatie van Bornemann & Fischbeck (1986).

Caprock-onderzoek

Bijna 30 boringen hebben de caprock en het daar juist onderliggende zout van de structuur Gorleben aangeboord. Er werd een geologische kaart samengesteld van de top zout. Onder de zoutspiegel komen zouten voor variërend van Zechstein 2 tot Zechstein 4, met een wisselende samenstelling van onoplosbare bestanddelen. Tevens komt de Hoofdanhydriet voor op een aantal plaatsen. Opmerkelijk bij de bestudering van de caprock boringen was, dat in de caprock zelf correleerbare facies aanwezig bleken te zijn (Liniengips, Sprenkelgips en Flasergips), die los staan van de variatie in het onderliggende steenzout. Men heeft hier vooralsnog geen verklaring voor.

De opname van hoge-resolutie seismiek door IGG-TNO is met name gericht op de in- en uitwendige opbouw van de caprock.

Helikopter-geofysica

Vanuit een helikopter werden elektromagnetische (geleidbaarheid) en radiometrische metingen (oppervlakte-geologie) langs profiellijnen over de zoutstructuren verricht. De afstand van de profiellijnen bedroeg bij Gorleben 200 m. Om een gebied van 15 x 20 km te verkennen werden 1562 profiel-kilometers

gevlogen. Deze methode werd met succes toegepast bij het in kaart brengen van de geohydrologische situatie rond Gorleben. Het voordeel van deze methode is de snelheid waarmee een gebied in kaart kan worden gebracht en het feit, dat men niet over vergunningen hoeft te beschikken, zoals o.a. bij een seismische veldopname. De methode kan met succes worden toegepast bij zoutpijlers, die op minder dan 120 m onder de oppervlakte gelegen zijn, of zoutpijlers waarboven verzilt water of slecht-doorlatende kleipakketten voorkomen. Bebouwde/geïndustrialiseerde gebieden bemoeilijken het succesvol uitvoeren van deze methode.

Referenties

Bundesamt für Strahlenschutz (1990). Fortschreibung des Zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben von Mai 1983, Salzgitter, April 1990 ISSN 0937-4434, 299 p.

Bornemann, O. (1991). Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach Bohrergebnisse. BfS Schriften, 4/91, ISSN 0937-4469, 66 p.

Bornemann, O. & R. Fischbeck (1986). Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. Z. dt. geol. Ges., vol. 137, p. 71-83.

Zirngast, M. (1991). Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben. Geol. Jb. Reihe A, Heft 132, 131 p.

3 Groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens

3.1 Inleiding

In Fase 1 van het OPLA Programma staan twee aspecten in het onderzoek centraal, namelijk de technische uitvoerbaarheid en de veiligheid van geologische opberging in de diepe ondergrond. Een onderdeel van de technische uitvoerbaarheid dat in dit hoofdstuk aan de orde komt, hangt samen met de inpasbaarheid van de opbergontwerpen in de Nederlandse zoutvoorkomens. Op basis van de inpasbaarheid is een proeve van een groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens gegeven. De uitkomsten van deze groepering zijn van *voorlopige* aard en bedoeld om richting te geven aan verder onderzoek daar een definitieve uitspraak over de inpasbaarheid pas gegeven kan worden als het inwendige van een of meerdere zoutvoorkomens in een eventuele volgende fase is onderzocht.
In dit hoofdstuk wordt voorts een indicatie gegeven voor een geologische groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens op basis van de te verwachten geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar. Het begrip "geologische stabiliteit" heeft hier betrekking op veranderingen in de toestand van de ondergrond, in het bijzonder in die van het zout, onder invloed van de te verwachten stijgsnelheid van het zout en van effecten van een te verwachten ijstijd. Deze groepering is alleen op geologische gronden gebaseerd en dient in feite in samenhang met ander keuze-overwegingen te worden bezien. De uiteindelijke betekenis van deze groepering voor de veiligheid van het opgeborgen afval kan pas worden aangegeven als de betrokken geologische processen in een veiligheidsstudie zijn geanalyseerd. Uit een gevoeligheidsanalyse in de huidige veiligheidsstudie PROSA komt naar voren dat de inwendige stijgsnelheid een van de meer gevoelige parameters is als het gaat om het veiligheidsrisico van opberging.

3.2 Samenvatting van de resultaten uit eerder onderzoek

Groepering op basis van inpasbaarheid van opbergontwerpen
In Fase 1 was een groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens uitgevoerd op basis van de inpasbaarheid van de opbergontwerpen (RGD-10.568, 1988; OPLA Cie, 1989). Geologische gegevens waren ontleend aan de geologische inventarisatie in het project GEO-1 (RGD-10.568, 1989). De mijnbouwkundige criteria betreffende de maximale diepte, de minimale dikte en de omvang van het zoutvoorkomen zijn afgeleid van Van Hattum & Blankevoort (1986) en Klein (1985).
Deze criteria waren per opbergtechniek en type zoutvoorkomen gekwantificeerd. In algemene zin betekende dit dat een zoutvoorkomen niet geschikt was voor enig opbergontwerp als het homogene zout dunner dan 400 meter was en/of de top van het homogene zout dieper dan 1800 meter lag. De maten van de opbergontwerpen waren afgestemd het grootste volume radioactieve afval in de drie voorgestelde strategieën voor afvalberging. Verder is bij de inpassing van de opbergontwerpen uitgegaan van flexibele horizontale en verticale afmetingen van de opbergfaciliteiten.
Bij de mijnbouwkundige vaststelling van de benodigde minimale dikte van het zout was de aanwezigheid van een zoutpakket onder en boven de opbergfaciliteit inbegrepen en werd aangenomen dat het zout, op één of meerdere inhomogeniteiten na, homogeen is (RGD-10.568, 1988). Het homogene zout in Noord-Nederland bevindt zich in de Zechstein 2 Formatie en in Oost-Nederland in de Zechstein 1 Formatie. Op deze eenheden liggen nog pakketten inhomogeen steenzout van variabele dikte. Voor de verschillende regio's en typen zoutvoorkomens waren aannames gedaan betreffende de dikte van het inhomogene Zechstein steenzout. Deze diktewaarden waren van de diepte van de bovenzijde van de Zechstein Groep en van de dikte van de gehele Zechstein Groep afgetrokken om respectievelijk de diepte van de bovenzijde

en de dikte van het homogene steenzout te bepalen. Voorts was een negatieve correctie uitgevoerd op de, op basis van seismiek, gekarteerde omvang van de zoutstructuren. Uit de groepering kwam naar voren dat de diepteligging van de zoutvoorkomens in Noord-Nederland doorgaans de bepalende factor was. De omvang van de zoutvoorkomens bleek veelal voldoende te zijn. In Oost-Nederland was de dikte veelal de bepalende factor.

In Fase 1 waren 38 zoutvoorkomens onderscheiden, waaronder 19 pijlers, 15 kussens en 4 gebieden met gelaagd zout. De opbergmijn was inpasbaar in 16 zoutvoorkomens, in 21 was de inpassing niet mogelijk en voor 1 voorkomen was de inpasbaarheid onzeker. De optie droge cavernes in combinatie met diepe boorgaten paste in 10 zoutvoorkomens, in 24 zoutlichamen was dit niet mogelijk en voor 4 voorkomens was het onzeker. De optie natte cavernes in combinatie met diepe boorgaten was mogelijk in 23 van de 38 zoutvoorkomens, in 12 voorkomens was het niet uitvoerbaar en in 3 voorkomens was de inpasbaarheid van dit opbergontwerp onzeker.

Groepering op basis van toekomstige geologische stabiliteit

Na afloop van het project GEO-1 (RGD-10.568, 1988) was een vervolgstudie uitgevoerd met het doel een nadere groepering aan te brengen in het bestand van 26 zoutvoorkomens waarin een opbergfaciliteit inpasbaar was dan wel de inpasbaarheid onzeker was (RGD-30.010, 1990). De groepering was uitgevoerd op basis van de te verwachten geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar. Op deze, geologisch gesproken, middellange termijn zijn het met name de glaciale processen die de stabiliteit van de zoutvoorkomens kunnen beïnvloeden. Het meest ingrijpende proces is subglaciale erosie zoals dit tijdens de ijstijd van het Elsterien optrad. De geregistreerde maximale diepte van de gevormde depressies bedraagt 450 meter.

Voor de groepering op basis van de te verwachten geologische stabiliteit was een overweging betreffende de diepteligging van de zoutvoorkomens vastgesteld. Zoutvoorkomens die met hun top op dit moment minder diep dan 540 m onder het maaiveld liggen, worden mogelijk door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar beïnvloed. De dieptewaarde is een optelsom van de waarde voor subglaciale erosie van 450 meter, een aanname voor daaraan voorafgaande erosie door rivieren van 50 meter en een optredende zoutstijging van 40 meter.

De groepering resulteerde in een ondiepe groep van 7 zoutvoorkomens die mogelijk door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar worden beïnvloed, een diepe groep van 14 zoutvoorkomens die waarschijnlijk niet door subglaciale diepe depressies worden aangesneden en een intermediaire groep van 5 voorkomens waarvoor geen uitspraak mogelijk was.

3.3 Overzicht van de Nederlandse zoutvoorkomens

Voor het geologische onderzoek in OPLA Fase 1A is nieuwe informatie beschikbaar gekomen, met name afkomstig uit de reguliere kartering van de RGD van de diepe en ondiepe ondergrond. Deze nieuwe verzameling informatie wordt gekenmerkt door een grotere nauwkeurigheid dan de informatie die in Fase 1 beschikbaar was. In Fase 1 van het OPLA Programma waren in totaal 38 zoutvoorkomens onderscheiden; in de huidige Fase 1A zijn in totaal 45 voorkomens geïdentificeerd (een voorkomen, Zuid-Drenthe, bestaat uit minimaal 3 diepgelegen zoutkussens, die in het onderhavige onderzoek niet nader zijn onderscheiden).

3.3.1 Nieuwe gegevens en onzekerheidsanalyse

Op dit moment zijn de karteringen in de regio's Noordwest-Friesland (kaartblad I; RGD, 1991) en Noord-Friesland (kaartblad II; RGD, 1992) gerealiseerd. Hiervan is voor de groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens alleen kaartblad II van belang. De zeer spoedig te publiceren kaartbladen III (Groningen; RGD, in druk b) en V (Zuid-Friesland; RGD, in druk c) zijn ook gebruikt bij de nieuwe groepering van de Nederlandse zoutvoorkomens.

Voor de regio's Zuid-Groningen, Drenthe en het overige deel van Oost-Nederland is nagenoeg geen nieuw kaartmateriaal beschikbaar gekomen. De informatie betreffende het Zechstein voor deze regio's berust voor een groot deel op de kaartinformatie uit het RGD-rapport 6.009 (1984).

Naast de genoemde kaartbladen is tijdens de

groepering ook gebruik gemaakt van de interpretatie van een seismische lijn. Deze seismische lijn, in 1986 geschoten door Delft Geophysical voor onderzoek van de onderkorst, behoort tot de openbare gegevens (Remmelts & Duin, 1990). Verder is er gebruikt gemaakt van gegevens in de Toelichting bij de Geologische kaart van Nederland (kaartblad 12; RGD, 1990) en van de kaart van de bovenzijde van de pre-Tertiaire afzettingen op de geologische kaart van Nederland (kaartblad 28 Oost/29; RGD, in druk a). Gegevens over de omvang van een tweetal zoutpijlers konden afgeleid worden uit concessie-aanvragen van de Gasunie betreffende eventueel toekomstige gasopslag (openbaar gemaakt in 86/87).

Tijdens de uitvoering van het project GEO-1A is ook de nauwkeurigheid van ruimtelijke data gekwantificeerd, door de bepaling van de standaarddeviatie van de waarnemingsfout (RGD-30.101, 1992; zie ook paragraaf 2.1.1 van dit rapport). De waarnemingsfout is het verschil tussen de werkelijke diepte en de waargenomen diepte op dezelfde waarnemingslokatie. Voor lokaties zonder waarnemingen moet inzicht in de ruimtelijke data verkregen worden door interpolatie. Voor het verkrijgen van de totale standaarddeviatie van de ruimtelijke gegevens, moet op die lokaties de standaarddeviatie van de kaart-interpretatiefout geometrisch opgeteld worden bij de standaarddeviatie van de waarnemingsfout van nabijgelegen data.

Deze analyse van de nauwkeurigheid resulteert uiteindelijk in een ruimtelijke weergave van de standaarddeviatie per lokatie, waaruit één waarde voor de totale standaarddeviatie afgeleid kan worden door middeling. In genoemd tussenrapport is de gemiddelde standaarddeviatie van de dieptekaart top Zechstein (RGD-6.009, 1984) bepaald op 300 m. Voor kaartblad II, top Zechstein (RGD, 1992) moet deze waarde een factor 2 à 3 geringer zijn. Hetzelfde geldt vermoedelijk voor kaartblad V, waarvoor de basisgegevens bij benadering even ruim gespatieerd zijn. Voor het grootste deel van kaartblad III heeft men gebruik kunnen maken van zeer dichtgespatieerde basisgegevens (3-dimensionale seismische gegevens), zodat de gemiddelde totale standaarddeviatie in deze regio maximaal slechts 50 meter bedraagt. De gemiddelde standaarddeviatie van de interpretatie van seismische lijn 8601N is geschat op 40 m.

3.3.2 Bijgewerkt overzicht

Noord-Nederland: Friesland, Groningen en Drenthe

De ter beschikking gekomen kaartbladen II, III en V van de Geologische Atlas van de ondergrond van Nederland leidden tot een nieuwe inventarisatie van zoutstructuren in Noord-Nederland, waarbij structuren in zee buiten beschouwing gelaten werden. Op de structuur Ulrum na, werd de aanwezigheid van de structuren, die onderscheiden waren in OPLA-Fase 1 bevestigd. Inzichten aangaande de geometrie, de lokatie en de diepte van de betreffende structuren werden aanzienlijk verbeterd, evenals de inzichten in de mate van onnauwkeurigheid van deze gegevens. Zo blijken er in Groningen voornamelijk grillige en langgerekte structuren voor te komen en nauwelijks cilindervormige structuren.
De meer gedetailleerde informatie voor het vasteland heeft geresulteerd in de registratie van een zestal nieuwe diepe zoutstructuren (diepte >> 1 km) in Noord-Nederland: één in de zuidoosthoek van Friesland en een aantal in en nabij het in Fase 1 onderscheiden gebied met gelaagd zout Groningen. De gebieden met gelaagd zout in Groningen en Friesland konden door een dichter seismisch datanet beter gelokaliseerd en geëvalueerd worden. De beschikbare seismische lijn, die het oostelijke deel van de ondergrond in Noord-Nederland doorsnijdt, laat zien dat het gebied met gelaagd zout Zuid-Drenthe in feite bestaat uit een aantal zoutkussens. In dit gebied zijn minimaal drie zoutkussens te onderscheiden die hier niet nader benoemd zijn. De aanwezigheid van het overgrote deel van de structuren die in Fase 1 in Noord-Nederland onderscheiden zijn, is bovendien bevestigd door een meer recente inventarisatie ten behoeve van de planning van het gebruik van de Nederlandse ondergrond (Schokking e.a., 1992). In tabel 9 is de nieuwe groepering op de diepte van de zoutvoorkomens in Noord-Nederland gegeven; de laatste 6 kolommen hebben betrekking op de inpasbaarheid van opbergfaciliteiten, hetgeen in de volgende paragraaf besproken wordt.

Zoutvoorkomen	Type	Diepte bovenzijde Zechstein in top[3] t.o.v. N.A.P. (in meters)	Onnauwkeurigheid in diepte bovenzijde Zechstein (in meters)[1]	Diepte homogeen steenzout t.o.v. N.A.P. (in meters)	Bruikbare dikte homogeen steenzout (in meters)	Smalste doorsnede homogeen steenzout / op diepte (in meters)	Inpasbaarheid opbergontwerp		
							M	DC	NC
Zuidwending	P	115	-25 (100-250)	170	>2500	1400/500	+	+	+
Schoonlo	P	121	-25 (100-250)	210	>3000	1800/210	+	+	+
Pieterburen	P	218	-25 (50)	310	2400	1300/600-750	+	?	+
Onstwedde	P	300	± 40 (100-250)	350-400	>1000	1750/1000-1500?	+	?	+
Gasselte-Drouwen	P	300?-450	100-250	350?-500	>2000	>2000/1000?	+	?	+
Winschoten	P	383	-25 (50)	420	2100	1200/650	+	?	+
Anloo	K	550?-877	-100-250	850?-1180	±1500	1750/1250	?	-	+
Ternaard	K	600-700	75-100	650-750	2750-2850	1500/750-850	+	?	+
Hooghalen	P	600?-810	250-500	650?-860	>1250	1800/1500	?	?	+
Bourtange	P	630?	nb	680?	nb	nb	nb	nb	nb
Hoogeveen	P	750-972	-100-250	800-1020	1300	700/1000; 900/1250	?	-	+
Hoogezand	K	900-1000	-50	1300-1400	1300	1200/1300-1400	?	-	+
Klein-Ulsda	P	1000-1100	50	1050-1150	2000	600/1150-1200	?	-	+
Landschaftspolder	P	1000-1100	100-250	1050-1150	2100	1300/1200-300	?	-	+
Groningen	K	1100-1200	50	1500-1600	1200-1300	1500/1500-1600	-	-	+
Gerkesklooster	K	1100-1200	100-250	1400-1500	1000-1500	1500/1400-1500	?	-	+
Veendam	K	1150-1341	-100-250	1550-1740	850-1250	1500/1650-1750	-	-	?
Lieveren	K	1250-1500	-100-250;+75	1650-1900	±1000	1500/1650-1900	-	-	?
Norg	K	1250-1500	100-250	1650-1900	>1000	2500/1650-1900	-	-	?
Dwingelo	K	1300-1355	-75-100	1600-1660	±700	2500/1600-1660	-	-	+
Delfzijl	K	1300-1400	25	1350-1450	1300-1400	1400/1500-1550	-	-	+
De Wijk	K	1400-1442	-75-100	1700-1720	±500	>2000/1700-1720	-	-	?
Winsum	K	1400-1500	50	1800-1900	1000-1300	1500/1800-1900	-	-	?
Engwierum	K	1400-1500	75-100	1450-1800	1500-1750	1000/1500; 1500/1600-1800	?	-	?
Dedemsvaart	K	1500-1518	-100-250	1800-1820	900	1250/1800-1820; 2000/2000	-	-	?
Bierum	P	1500-1600	25	1550-1650	800	1500/1800	-	-	-
Nieuw-Scheemda	K	1500-1600	50	1550-2000	600-900	1500/1700-2000	-	-	?
Noordbroek	K	1500-1600	50	1550-2000	600-900	1500/1650-2000	-	-	?
Steenbergen	K	1500-1600	100-250	1800-2000	600-700	>2000/1800-2000	-	-	?
Haren	K	1600-1700	50	2000-2100	1000	>3000/2000-2100	-	-	-
Zuid-Drenthe[2]	K	>2000		>>2000	n.v.t.	n.v.t.	-	-	-
Groningen	G	1500-1600	50	1550-1650	1000	>2000/1700	-	-	+
Friesland	G	1800-1900	-75-100	1840-1940	500-600	>7000/1900	-	-	?

Tabel 9
Overzicht van zoutvoorkomens in Noord-Nederland gerangschikt naar de diepte van bovenzijde Zechstein en type zoutvoorkomen (zoutopwelving of gelaagd zout). [1] Standaarddeviatie van de ruimtelijke data van de top van het zoutvoorkomen; een minteken geeft de waarde aan in negatieve diepterichting; in deze gevallen is de standaarddeviatie in positieve diepterichting minimaal vanwege gegevens uit boringen; voor de structuren, waarvan de diepte van de top door boringen nauwkeurig bekend is, is tussen haakjes de standaarddeviatie van de overige ruimtelijke gegevens (verkregen uit seismische gegevens) weergegeven, gebruikt bij onzekerheden in de bepaling van de omvang. [2] Zuid-Drenthe omvat minimaal 3 zoutkussens. [3] Diepte bovenzijde Zechstein inclusief caprock. Afkortingen: P: pijler; K: kussen; G: Gelaagd zout; HT: Halotektonische structuur; nb: niet bekend; M: opbergmijn; DC: droge caverne; NC: natte caverne.

Oost-Nederland: Twente en de Achterhoek

De informatie voor Oost-Nederland (Twente en de Achterhoek) is, zoals in Fase 1 al bleek, over het algemeen zeer schaars. Dit blijkt ook uit de afwijkingen tussen de inventarisatie in Fase 1A en de hiervoor aangehaalde inventarisatie uit 1992.

De structuur Weerselo blijkt uit 2 individuele culminaties te bestaan die in het nieuwe overzicht van Nederlandse zoutvoorkomens als twee separate structuren aangegeven zijn, te weten de structuren Weerselo en Deurningen. In Noord-Twente, op de grens met Duitsland, blijkt een zoutkussen aanwezig te zijn. Dit voorkomen, dat in Fase 1 als gelaagd zout aangemerkt werd, wordt het zoutkussen Tubbergen genoemd. De gelaagdheid van het zout in de rest van het gebied Twente wordt betwijfeld. Mogelijk gaat het hier om twee regio's met zoutkussens (Twente I en II). Afgezien van de structuren Weerselo, Deurningen en Tubbergen is over de lokatie van de zoutvoorkomens in Oost-Nederland niet meer duidelijkheid te geven dan in Fase 1 verkregen was.

Het zoutvoorkomen Ermelo dat in Fase 1 benoemd is, is niet meer als een separaat voorkomen in het onderhavige overzicht meegenomen. Het voorkomen Ermelo maakt deel uit van een reeks kleine zoutlichamen die in een brede Z.O.-N.W. gerichte band in Midden-Nederland (Gelderland-IJsselmeer-Noord-Holland) aanwezig zijn. Deze zoutvoorkomens zijn alle of nagenoeg alle te klein om volgens de opgelegde criteria, in aanmerking te komen voor de opberging van radioactief afval. In tabel 10 zijn de onderscheiden zoutvoorkomens in Oost-Nederland weergegeven; de laatste 6 kolommen hebben betrekking op de inpasbaarheid van opbergfaciliteiten, hetgeen in de volgende paragraaf besproken wordt.

3.4 Nadere groepering op basis van de inpasbaarheid van het opbergontwerp

3.4.1 Mijnbouwkundige en geologische randvoorwaarden voor de inpasbaarheid van opbergontwerpen

Het naast elkaar leggen van mijnbouwkundige beperkingen en de beschreven geologische gegevens geeft een indruk omtrent de mijnbouwtechnische mogelijkheden voor lokatiespecifieke inpassing van opbergontwerpen. Als mijnbouwkundige randvoorwaarden worden de resultaten van de in OPLA Fase 1 bestudeerde technieken voor opberging aangehouden (OPLA Cie, 1989).

Zoutvoorkomen	Type	Diepte bovenzijde Zechstein in top t.o.v. N.A.P. (in meters)	Onnauwkeurigheid in diepte bovenzijde Zechstein (in meters)	Diepte homogeen steenzout t.o.v. N.A.P. (in meters)	Bruikbare dikte homogeen steenzout (in meters)	Smalste doorsnede homogeen steenzout / op diepte (in meters)	Inpassing opbergontwerp		
							M	DC	NC
Plantengaarde	P/HT	63?	nb	160?	<550?	nb	-	-	-
Deurningen	P/HT	253	-25	290	±1000	750/290?	?	?	?
Corle	K	325?	nb	400?	<300	1500/500-600?	-	-	-
Haaksbergen	K	400-500?	nb	500-600?	<400?	nb	nb	nb	nb
Weerselo	P/HT	438	-25	460	±1000	850/460?	?	?	?
Ruurlo	K	496	nb	650?	<125?	n.v.t.	-	-	-
Gelria	K	508	nb	570	<250	n.v.t.	-	-	-
Groenlo	K	711	nb	790	<300	1400/800	-	-	-
Twente I	K?	750-1000	-100-250;+50	1050-1300	<700	>2000/1250-1300	?	-	?
Twente II	K?	750-1000	-100-250;+50	1050-1300	<400	>2000/1050-1300	?	-	?
Tubbergen	K	1000-1250	-100-250	1300-1550	700-900	>2000/1300-1550	?	-	+
Lichtenvoorde	K	nb	nb	nb	<300	n.v.t.	-	-	-

Tabel 10
Overzicht van zoutvoorkomens in Oost-Nederland gerangschikt naar de diepte van bovenzijde Zechstein. Voor afkortingen en opmerkingen: zie tabel 9.

Positie isolatieschild	Pijler	Kussen	Laag
zoutdak	300	100/200 *	100/200 *
zoutschild	200	200	200
zoutzool	100	100	100

Tabel 11
*Vereiste diktes (in meters) van het zoutdak, zoutschild en de zoutzool voor de verschillende typen zoutstructuren. * Voor aanleg van een opbergmijn in kussens en lagen is de vereiste dikte van het zoutdak 100 m.*

Isolatieschild

Uit veiligheidsoverwegingen is er in de zoutstructuur een isolatieschild boven (zoutdak), onder (zoutzool) en opzij (zoutschild) van de opbergfaciliteit vereist, dat bestaat uit homogeen zout. De vereiste diktes van dit isolatieschild variëren voor de verschillende typen zoutvoorkomens (zie tabel 11).

Maximumdiepte opbergfaciliteiten

De drie hoofdopbergtechnieken voor de opslag van radioactief afval (een opbergmijn, en diepe boorgaten in combinatie met droge of natte cavernes) hebben uit mijnbouwtechnische overwegingen een maximum dieptebereik. Voor het aanleggen van een mijn geldt een maximum diepte van 1500 m; voor droge en natte cavernes bedraagt de maximum diepte respectievelijk 1000 m en 2000 m. Vanuit mijnen kunnen nog boorgaten aangelegd worden, die dieper gelegen zijn dan 1500 m.

Maximum diepte top homogeen steenzout

Wanneer men de gegevens betreffende het isolatieschild (tabel 11) met de maximum diepte van de opbergfaciliteit combineert, verkrijgt men per type zoutvoorkomen en per type opbergfaciliteit een dieptecriterium voor de maximale diepte van top homogeen steenzout in het zoutvoorkomen, dat wil zeggen de maximale diepte waaronder een opbergfaciliteit nog aangelegd kan worden (tabel 12). Deze waarden zijn als beslissingslijnen uitgezet in figuren 47C & D.

Opbergfaciliteit	Pijler	Kussen	Laag
mijn	1200	1400	1400
droge caverne	700	800	800
natte caverne	1700	1800	1800

Tabel 12
Maximale diepte van de top van het homogene steenzout in een willekeurige zoutpijler, kussen of laag per type opbergfaciliteit (in meters).

Afmetingen benodigd zoutvolume per opbergontwerp

Voor de geometrische inpassing van de verschillende opbergfaciliteiten in de geïnventariseerde zoutvoorkomens zijn voorbeeldafmetingen van het benodigde zoutvolume gebruikt, die afgeleid zijn van concrete voorontwerpen van Van Hattum & Blankevoort (1986). De benodigde afmetingen (inclusief isolatieschild) van de homogene zoutlichamen zijn per type zoutvoorkomen en opbergfaciliteit aangegeven in tabel 13.

Deze vormen kunnen niet zonder meer gewijzigd worden om inpassing in grillige of langgerekte zoutlichamen mogelijk te maken, vanwege het feit dat daardoor het nuttig opbergvolume (totale opbergvolume - isolatieschild) verminderd wordt. Daarnaast is de hoeveelheid afval, die hierin opgeslagen kan worden onder meer afhankelijk van stapelhoogte, constructiehoogte en laterale afstanden tussen opbergeenheden (Van Hattum & Blankevoort, 1986). Bij het in acht nemen van deze overwegingen zal het nuttig opbergvolume, bij een vervorming van de beschreven ideale afmetingen in de meeste gevallen nog verder afnemen. Dit pleit voor een niet-flexibele benadering van de afmetingen van de opbergontwerpen die in Fase 1 vastgesteld zijn.

Dikte caprock en/of inhomogeen zout

De beschikbare ruimtelijke gegevens aangaande de diepte en geometrie van de zoutstructuren bestaan over het algemeen uit gegevens over de diepte van de boven- en onderzijde van het Zechstein. Aangezien een opbergfaciliteit aangelegd dient te worden in homogeen zout, is kennis van de diepte en geometrie van het pakket homogeen zout in het Zechstein vereist. Bij de mijnbouwkundige vaststelling van de minimale dikte van het zout is rekening gehouden met de aanwezigheid van één of meerdere inhomogeniteiten, afhankelijk van het type zoutstructuur.
In Noordoost-Nederland treft men homogeen steenzout in het algemeen aan in de Zechstein 2 Formatie. Voor de diepte van de onderzijde van het homogene zout dient men dus rekening te

Tabel 13
Voorbeeldafmetingen (balk- of cilindervormig) van de benodigde homogene zoutlichamen afgeleid van concrete voorontwerpen van elk type opbergfaciliteit voor zoutpijlers, kussens of lagen (in meters).

Opbergfaciliteit	Dimensie	Pijler	Kussen	Laag
mijn (rechthoekig volume)	breedte	1220	1220	n.v.t.
	lengte	600	600	n.v.t.
	hoogte	900	350	n.v.t.
natte caverne (cilinder)	doorsnede	920	1500	1500
	hoogte	1220	360	400
droge caverne (cilinder)	doorsnede	1220	1500	1800
	hoogte	1220	360	360

houden met de dikte van de Zechstein 1 formatie. De diepte van de basis van het Zechstein en ook de Zechstein 2 Formatie is echter onder een groot deel van het gebied ruimschoots groter dan 2000 meter. Voor de diepte van de bovenzijde van het homogene zout dient men rekening te houden met de Zechstein 3 en 4 Formatie en, indien aanwezig, met de caprock. Gegevens over de lokale dikte van deze 3 eenheden zijn onder andere gerelateerd aan gegevens over de lokale aanwezigheid van de Onder-Bontzandsteen Formatie bovenop het Zechstein (tabel 14).

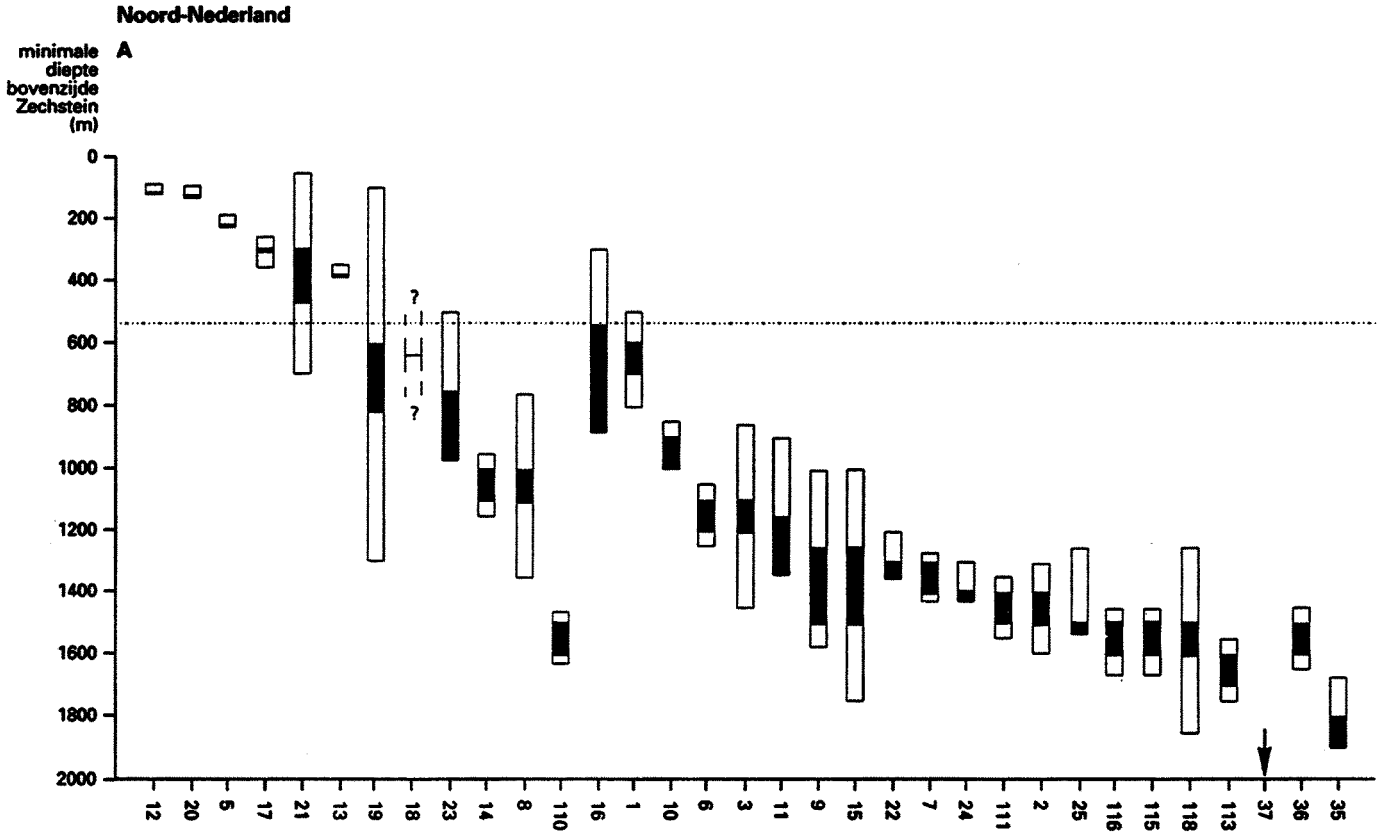
3.4.2 Inpassing in de Nederlandse zoutvoorkomens

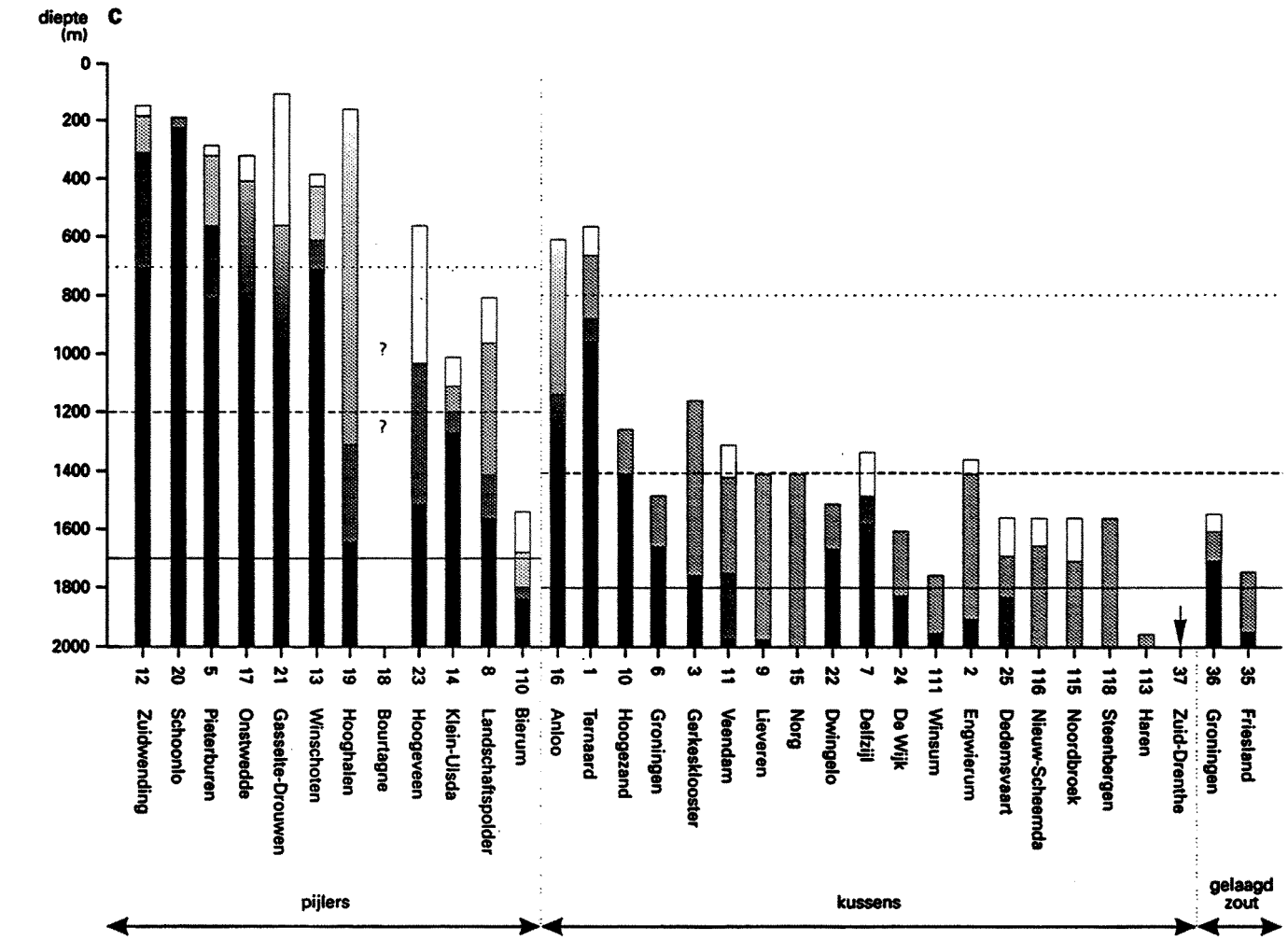
Als vermeld, wordt er bij de inpassing gebruik gemaakt van dezelfde aanpak als in Fase 1, maar dan met een niet-flexibel opbergontwerp en met recentelijk beschikbaar gekomen data. Verder wordt er rekening gehouden met de optredende onzekerheden in de dieptegegevens (zie paragraaf 3.2). In vrijwel alle gevallen is de diepteligging van het homogene zout in de structuur, in combinatie met de omvang van het homogene zout op kritische dieptes voor een bepaald opbergontwerp, beslissend voor de inpasbaarheid van dat ontwerp in een zoutvoorkomen alsmede de standaarddeviatie van deze twee gegevens. In enkele gevallen is de dikte van het homogene zout, dan wel aanwijzingen voor tektonische verstoring doorslaggevend (in Oost-Nederland). Het naast elkaar leggen van de diepte-, omvang- en diktegegevens en de onzekerheden daarin (de middelste vier kolommen in tabellen 9 en 10) met de beschreven mijnbouwkundige beperkingen resulteert in een beslissing over de mogelijkheden tot inpasbaarheid van een der 3 verkozen opbergontwerpen (strategie B/C': de laatste 3 kolommen in tabellen 9 & 10, uitgebeeld in figuren 47C & D).

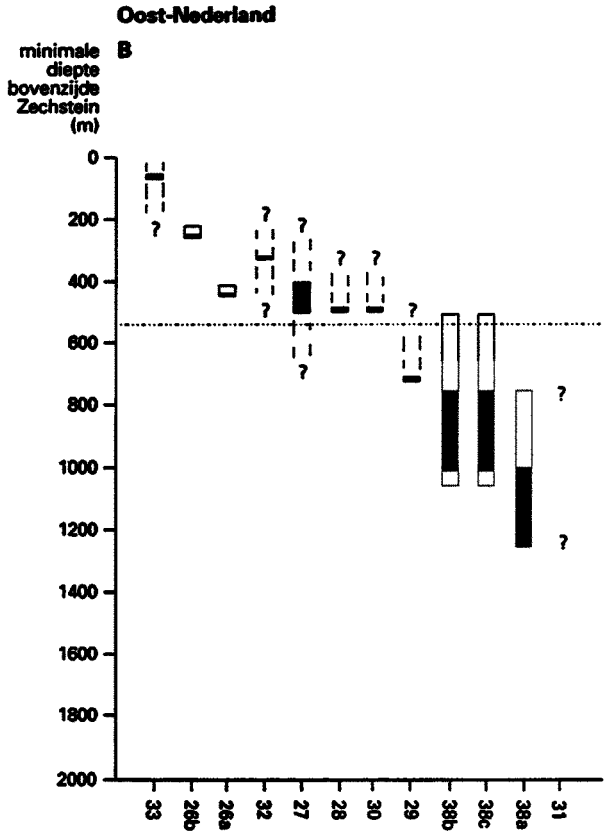
In Noord-Nederland zijn in totaal 33 zoutvoorkomens onderscheiden. Voor één van deze voorkomens kan de inpasbaarheid van de mijnbouwconcepten niet worden geëvalueerd door het ontbreken van een deel van de noodzakelijke gegevens. Voor de resterende 32 zoutvoorkomens is de inpasbaarheid van de drie afzonderlijke opbergontwerpen onderzocht.
In 7 voorkomens is de opbergmijn waarschijnlijk inpasbaar (+); 17 voorkomens zijn waarschijnlijk te gering van omvang of liggen te diep (-) en voor de resterende 8 ontwerpen is de mogelijkheid tot inpassing van een mijn onzeker (?).
De optie droge cavernes in combinatie met diepe boorgaten is waarschijnlijk in 2 van de 32 voorkomens inpasbaar; 24 zoutvoorkomens zijn te klein en voor 6 zoutlichamen is de mogelijkheid tot technische uitvoerbaarheid van de droge cavernes onzeker.
De aanleg van natte cavernes in combinatie met

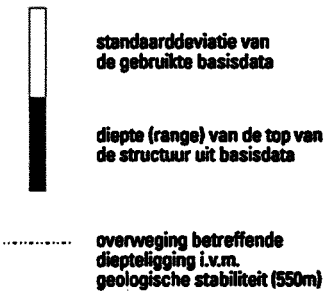
Tabel 14
De lokale dikte van niet-homogeen zout (caprock en/of Zechstein 3/4) bovenin een zoutstructuur (in meters).

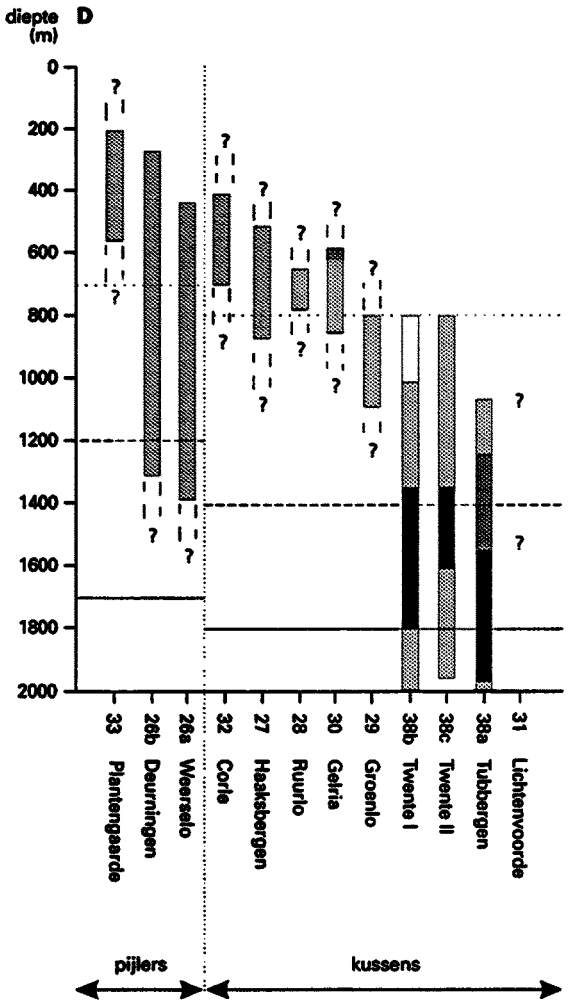
Onder-Bontzandsteen Formatie		Pijler	Kussen	Laag
afwezig	diepte Zechstein >300 m	50	50	50
	diepte Zechstein <300 m	100		
aanwezig	Friesland	n.v.t.	300	35
	Groningen & Noord-Drenthe		400	300
	Zuid-Drenthe	n.v.t.	300	200
	Twente & de Achterhoek		100	100


Noord-Nederland
A
minimale diepte bovenzijde Zechstein (m)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
?
?
12 20 5 17 21 13 19 18 23 14 8 110 16 1 10 6 3 11 9 15 22 7 24 111 2 25 116 115 118 113 37 36 35


C
diepte (m)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
?
?
12 Zuidwending
20 Schoonlo
5 Pieterburen
17 Onstwedde
21 Gasselte-Drouwen
13 Winschoten
19 Hooghalen
18 Bourtange
23 Hoogeveen
14 Klein-Ulsda
8 Landschaftspolder
110 Bierum
16 Anloo
1 Ternaard
10 Hoogezand
6 Groningen
3 Gerkesklooster
11 Veendam
9 Lieveren
15 Norg
22 Dwingelo
7 Delfzijl
24 De Wijk
111 Winsum
2 Engwierum
25 Dedemsvaart
116 Nieuw-Scheemda
115 Noordbroek
118 Steenbergen
113 Haren
37 Zuid-Drenthe
36 Groningen
35 Friesland
pijlers
kussens
gelaagd zout







Op de betreffende diepte geldt:

aanwezigheid homogeen zout?	omvang groot genoeg ?	beslissing of het opbergconcept toepasbaar is
mogelijk	nee	-
ja	nee	-
mogelijk	mogelijk	?
ja	mogelijk	?
ja	ja	+

maximum diepte voor de aanleg van een droge caverne

maximum diepte voor de aanleg van een mijn

maximum diepte voor de aanleg van een natte caverne

Figuur 47
Staafdiagrammen van A. Diepte van de top van de zoutvoorkomens in Noord-Nederland met diepte-overweging betreffende de te verwachten geologische stabiliteit in de komende 100.000 jaar, B. Idem voor zoutvoorkomens in Oost-Nederland, C. Dieptebereik van het homogene steenzout in Noord-Nederland met dieptecriteria voor voor de verschillende opbergontwerpen, D. Idem voor Oost-Nederland.

diepe boorgaten is in 18 van de 32 voorkomens wat omvang en diepte van het homogene zout betreft waarschijnlijk uitvoerbaar. Drie zoutvoorkomens zijn te klein of liggen te diep, en voor 11 voorkomens is de uitvoerbaarheid van de derde optie onzeker.

In Oost-Nederland zijn in totaal 12 individuele zoutvoorkomens onderscheiden. Voor één voorkomen ontbreekt een deel van de relevante gegevens om de inpasbaarheid van het opbergontwerp te toetsen. Waarschijnlijk is in geen van de 11 resterende voorkomens de optie opbergmijn of droge cavernes inpasbaar. In 5 voorkomens is de mogelijkheid tot aanleg van een opbergmijn onzeker; in de overige zes is deze optie waarschijnlijk niet uitvoerbaar.
De uitvoerbaarheid van de optie met droge cavernes is niet zeker in 2 van de 11 voorkomens; in de overige voorkomens is deze optie waarschijnlijk niet uitvoerbaar.
In 1 structuur is het waarschijnlijk mogelijk een opbergfaciliteit bestaande uit nat bedreven cavernes en diepe boorgaten aan te leggen. In 6 voorkomens is deze optie waarschijnlijk niet uitvoerbaar en in de overige vier is de mogelijkheid tot inpassing onzeker.

Vergelijking met de resultaten uit Fase 1

Van de 38 zoutvoorkomens die in Fase 1 onderscheiden waren, kwamen er 17 in aanmerking voor de aanleg van een opbergmijn, waarvan 1 onzeker, 14 voor de aanleg van droge cavernes, waarvan 4 onzeker en 26 voor de aanleg van natte cavernes, waarvan 3 onzeker.
In Fase 1A zijn 45 zoutvoorkomens onderscheiden waarvan twee niet aan de mijnbouwtechnische groepering onderworpen zijn door het ontbreken van een deel van de noodzakelijke basisgegevens. 20 Van de resterende 43 voorkomens komen waarschijnlijk in aanmerking voor de aanleg van een opbergmijn, waarvan 13 onzeker, 10 voor de aanleg van droge cavernes, waarvan 8 onzeker en 34 voor de aanleg van natte cavernes, waarvan 15 onzeker. De betrouwbaarheid van de uitspraken in Fase 1A is door het kwantificeren van de onzekerheden in de geologische informatie beduidend toegenomen ten opzichte van Fase 1.
Ongeveer 30% van de inpassingen van opbergontwerpen in Fase 1, is in Fase 1A aangepast door het beschikbaar komen van nieuwe gegevens, door het in acht nemen van de onzekerheden in de ruimtelijke gegevens in Fase 1A of door het toepassen van niet-flexibele criteria. Een groot deel van de aanpassingen heeft dan ook betrekking op die voorkomens waarvan de inpasbaarheid van een opbergontwerp in Fase 1 voor mogelijk gehouden werd maar nu in Fase 1A als onzeker beschouwd wordt. Vier voorkomens die in Fase 1 nog geschikt leken voor de aanleg van een specifieke opbergfaciliteit, blijken in Fase 1A waarschijnlijk niet geschikt te zijn voor de uitvoering van dat specifieke opbergontwerp.
Een viertal opbergmogelijkheden waarover in Fase 1 onzekerheden bestonden betreffende de inpasbaarheid, blijken volgens de inzichten in Fase 1A niet in aanmerking te komen voor de aanleg van dat ontwerp. Het betreft hier de drie opbergontwerpen in het zoutkussen Groenlo en de optie droge cavernes voor de pijler Landschaftspolder. 22 Mogelijkheden tot het inpassen van een opbergfaciliteit (van de 3 opties x 38 zoutvoorkomens) die in Fase 1 inpasbaar (13), dan wel niet inpasbaar (9) leken, blijken in Fase 1A onzeker, vanwege de geëvalueerde standaarddeviaties in de beschikbare ruimtelijke gegevens.

3.4.3 Alternatieve methode op basis van beschikbare opbergvolume in zoutstructuren

Voor de geometrische inpassing van opbergfaciliteiten die in de vorige paragraaf beschreven is, is voor de bredere structuren met name de diepteligging van het homogene zout beslissend. Voor smallere (meestal hoger gelegen) structuren kunnen de (niet-flexibele) afmetingen van opbergfaciliteiten afgeleid uit Van Hattum & Blankevoort (1986), beslissend zijn. Deze voorgestelde cilindervormige en kubische opbergvolumes zijn gebaseerd op min of meer achterhaalde standaardbeschrijvingen van zoutstructuren met een cirkelvormige dwarsdoorsnede. Nieuwe inzichten en vooral ook de nieuwe ruimtelijke data wijzen erop dat langgerekte, smalle structuren overheersen in Noord-Nederland. Gezien de flexibiliteit van de ontwerpen hoeft dit geen problemen voor de inpasbaarheid op te leveren, maar als vermeld, moeten meer flexibele afmetingen wel blijven voldoen aan de mijnbouwtechnische voorschriften.
Vanuit deze overwegingen is een andere aanpak van deze problematiek wenselijk, namelijk een

weergave van de geometrie en het volume van de bruikbare opbergruimte per zoutvoorkomen. Als men keuzes voor de te volgen opbergtechniek maakt, dan kan men op basis hiervan voor een willekeurige zoutstructuur aan de hand van mijnbouwtechnische randvoorwaarden een opbergontwerp projecteren in deze opbergruimte.

Meer informatie betreffende de mijnbouwtechnische randvoorwaarden (geometrie, flexibiliteit en minimaal benodigde volume van opbergontwerp) is echter nodig om de inpasbaarheid van de opbergontwerpen in Nederlandse zoutstructuren, op basis van de geometrie en de grootte van het beschikbare opbergvolume, verder te kunnen uitwerken. Voorts is niet voldoende, gedetailleerde kaartinformatie voorhanden om de hier beschreven methode met succes op alle Nederlandse zoutvoorkomens toe te passen.

In de voorgestelde alternatieve methode kan men twee stappen onderscheiden:
1. Berekening van de vorm en de grootte van het beschikbare opbergvolume.
2. Betrouwbaarheidsanalyse van het berekende volume.

Berekening van het opbergvolume
Na digitalisatie en contouring van de beschikbare ruimtelijke data in de omgeving van een zoutvoorkomen kan de plaatsgebonden diepte van de bovenzijde van het nuttige opbergvolume berekend worden door de plaatsgebonden dikte van het niet-homogene zout (caprock en/of Zechstein 3/4; zie tabel 11 en 14) en het isolatieschild rekentechnisch te verwijderen van de bovenzijde van het Zechstein. Hiervoor werd onder meer een algoritme ontworpen dat de plaatsgebonden verticale dikte van het zoutschild en Zechstein 3/4 berekent, gerelateerd aan de plaatsgebonden helling en hellingsrichting van de top van het Zechstein. In figuur 48 zijn modellen van een pijler en een kussen weergegeven met specificatie van het niet-homogene zout en het isolatieschild.
De onderzijde van de opbergruimte is vastgelegd door een constante waarde: de maximumdiepte voor de verschillende opbergfaciliteiten (zie paragraaf 3.3.1: Maximale diepte opbergfaciliteit). Het volume en de geometrie van de ruimte gelegen tussen de twee beschreven vlakken kan berekend worden met behulp van het pakket SURFER voor data-analyse en grafische presentatie (Golden Software, Golden, Co, V.S.). De digitaal opgeslagen geometrie van de beschikbare opbergruimte per structuur kan in twee of drie dimensies weergegeven worden, zodat een opbergfaciliteit van willekeurige vorm volgens mijnbouwtechnische normen ingepast kan worden. Het volume van de beschikbare opbergruimte en het totale volume van het Zechstein kan per structuur en per opbergfaciliteit berekend en weergegeven worden. In figuur 49 is een voorbeeld gegeven van een gedigitaliseerde dieptekaart van de bovenzijde van het Zechstein en de geconstrueerde dieptekaart van de bovenzijde van de beschikbare opbergruimte tot op een diepte van 2.000 meter.

Betrouwbaarheidsanalyse
In eerste instantie wordt de onzekerheid van de digitalisatie van de top van het Zechstein en de contouring methode (Kriging) geanalyseerd. Een test heeft opgeleverd dat meerdere digitalisaties van dezelfde structuur heeft geresulteerd in een gemiddelde plaatselijke variatie van de diepte van circa 5 meter, voor steilere hellingen oplopend tot circa 20 meter. Het variëren van de contouring methode heeft variaties in opbergvolumes opgeleverd van kleiner dan 1 . Daarnaast wordt per structuur de invloed van de standaarddeviatie van de diepte van de top van het Zechstein op de standaarddeviatie van de bruikbare opbergruimte geanalyseerd. Onder de aanname van exacte waarden voor de dikte van Zechstein 3/4, caprock en isolatieschild is de plaatsgebonden standaarddeviatie van de top van de opbergruimte gelijk aan die van de top van het Zechstein. De standaarddeviatie van het volume kan statistisch benaderd worden door voor elke structuur een plaatsgebonden, per gridpunt variërende, random fout te genereren, die normaal verdeeld is met als standaarddeviatie de gemiddelde standaarddeviatie van de diepte over de betreffende structuur (bijv. af te leiden uit foutenkaartjes zoals in figuur 6 van paragraaf 2.1.1). Vanwege de onderlinge afhankelijkheid van de diepte op dicht bij elkaar gelegen lokaties moet het grid, waarop deze foutenanalyse wordt toegepast, voor elke structuur zodanig gekozen worden, dat de standaarddeviatie van de diepte niet meer significant bijdraagt aan de semivariantie van de diepte op de gebruikte gridafstand. Met andere woorden: de fluctuatie van de diepte op een gridpunt is onafhankelijk van de fluctuatie van de

diepte op een aangrenzend gridpunt. De standaarddeviatie van het volume wordt berekend uit 25 van dergelijke gegenereerde mogelijke weergaven van de bovenzijde van de beschikbare opbergruimte.

3.5 Nadere groepering op basis van geologische stabiliteit

Voor de groepering op basis van de te verwachten toekomstige geologische stabiliteit is de ontwikkelde overweging betreffende de diepteligging uit het project Vervolg GEO-1 gebruikt (RGD-30.010, 1991). Deze overweging houdt in dat zoutstructuren waarvan de toppen ondieper dan 540 meter onder het maaiveld liggen, mogelijk door subglaciale erosie, in combinatie met erosie door rivieren en zoutstijging, in de komende 100.000 jaar zullen worden beïnvloed. De overweging betreffende de diepteligging berust op de maximale en simultane activiteit van de processen die de bovenzijde van een zoutstructuur dichter bij het maaiveld kunnen brengen, namelijk (sub)glaciale erosie (450 meter), erosie door rivieren gecombineerd met zeespiegeldaling (50 meter) en de stijging van zoutstructuren door zoutstijging en subrosie (40 meter). De gegevens zijn gebaseerd op kennis van deze processen in het geologische verleden. Deze evaluatie van de geologische stabiliteit wil overigens niet zeggen dat daarmee de veiligheid van opberging in gevaar komt. Diverse (samenhangende) factoren spelen daarbij een rol waarover eerst in een veiligheidsanalyse duidelijkheid moet worden verkregen.
Door de inbreng van nieuwe inzichten in de processen erosie en zoutstijging zal hun effect op de ondergrond vermoedelijk enigszins wijzigen (erosie door rivieren: 20 meter; stijging van zoutstructuren: ongeveer 60 meter). In deze benadering is door afronding op 50-tallen een grenswaarde van 550 meter aangehouden (zie figuren 47A & B). In de toepassing van deze waarde op de diepteligging van de afzonderlijke zoutvoorkomens is rekening gehouden met de onzekerheden die in de beschikbare dieptegegevens aanwezig zijn (zie tabellen 9 & 10, kolommen 3 en 4).

Toepassing op de zoutstructuren in Noord- en Oost-Nederland

De toepassing van de overweging betreffende de verwachte geologische stabiliteit op de Nederlandse zoutvoorkomens is weergegeven in figuren 47A & B. Voor zes voorkomens zijn niet voldoende gegevens voorhanden betreffende de diepteligging en de onzekerheid hierin om de groepering op basis van de te verwachten toekomstige geologische stabiliteit door te voeren (vijf van deze structuren liggen in Oost-Nederland). Negen van de resterende 39 voorkomens kunnen in de komende 100.000 jaar door bovengenoemde processen worden aangetast. Vijf van deze 9 voorkomens voldoen qua geometrie (tabellen 9 & 10) waarschijnlijk aan de aanleg van een opbergfaciliteit; voor 2 voorkomens is het niet zeker en in 2 van de 9 voorkomens is het waarschijnlijk niet mogelijk om een opbergfaciliteit aan te leggen.
Voor 7 van de 39 voorkomens is geologische stabiliteit onzeker, vanwege onzekerheden in de diepte van het Zechstein, of deze door toekomstige subglaciale erosie kunnen worden beïnvloed. Vijf voorkomens in deze groep van zeven voldoen waarschijnlijk aan de mijnbouwtechnische criteria, voor twee voorkomens is dit onzeker.
Voor de overige 23 van de 39 voorkomens wordt toekomstige aantasting door destructieve processen onwaarschijnlijk geacht. In 8 van deze voorkomens is wat de omvang en diepteligging betreft een mijnbouwontwerp waarschijnlijk inpasbaar. In 11 gevallen is dit niet zeker en voor 4 zoutlichamen is de inpassing van een van de ontwerpen waarschijnlijk niet uitvoerbaar.

Vergelijking met de resultaten uit Fase 1

In Fase 1 was voor 26 zoutvoorkomens waarin een opbergontwerp inpasbaar bleek te zijn, een groepering op basis van de te verwachten toekomstige geologische stabiliteit uitgevoerd. Voor ongeveer 1 op de 3 van deze voorkomens ziet de groepering in Fase 1A er enigszins ander uit door het beschikbaar komen van nieuwe gegevens en het betrekken van de onzekerheid in de basis gegevens in Fase 1A.
Hierdoor zijn drie voorkomens, die in Fase 1 in de ondiepe of in de diepe groep waren ondergebracht, in Fase 1A in de intermediaire groep ingedeeld. Dit zijn de zoutstructuren Gasselte-Drouwen, Hoogeveen en Ternaard. Twee voorkomens, te weten Klein-Ulsda en Landschaftspolder, zijn op basis van de nieuwe gegevens ingedeeld in de groep zoutvoorkomens die waarschijnlijk niet door toekomstige subglaciale erosie beïnvloed zullen worden ofwel

de diepe groep. In Fase 1 maakten zij deel uit van de intermediaire groep.

3.6 Conclusies

1. In totaal zijn 45 zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland geïdentificeerd; in Fase 1 waren dit er nog 38. In de groep van 45 zoutvoorkomens zijn 15 pijlers (waarvan 3 halotektonische structuren), 28 kussens en 2 gebieden met gelaagd zout onderscheiden. Het grotere aantal is grotendeels het gevolg van het gebruik van nieuwe, meer nauwkeurige informatie van de ondergrond van Nederland.
2. De nauwkeurigheid van het kaartmateriaal dat in de loop van het OPLA Programma beschikbaar is gekomen, is beduidend toegenomen. De onzekerheid in de dieptekaart van de bovenzijde van het Zechstein die in Fase 1 gebruikt werd, liep op tot gemiddeld 100 à 250 meter. In de meest nauwkeurige kaarten van de bovenzijde van het Zechstein die in Fase 1A beschikbaar zijn gekomen, is de onzekerheid afgenomen tot 25 à 50 meter.
3. Indien nog steeds de uitgangspunten van Van Hattum & Blankevoort in 1986 zouden worden gehanteerd, past de opbergmijn waarschijnlijk in 7 zoutlichamen; 23 voorkomens zijn waarschijnlijk te klein of liggen te diep en voor 13 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. Het opbergontwerp voor droge cavernes in combinatie met diepe boorgaten past waarschijnlijk in 2 zoutlichamen; in 33 zoutvoorkomens is deze optie waarschijnlijk niet uitvoerbaar en voor 8 voorkomens is de inpasbaarheid onzeker. De constructie van natte cavernes in combinatie met diepe boorgaten is waarschijnlijk mogelijk in 19 zoutvoorkomens; in 9 voorkomens is de aanleg waarschijnlijk niet mogelijk en voor 15 voorkomens is het onzeker. Voor twee zoutvoorkomens in de ondergrond van Nederland was het door het ontbreken van voldoende relevante gegevens niet mogelijk de inpasbaarheid van de opbergontwerpen te evalueren.
Deze groepering verschilt op onderdelen van die in Fase 1 omdat nieuwe ruimtelijke gegevens zijn gebruikt, de onzekerheden in de gegevens meegenomen zijn en de opbergontwerpen zonder flexibele dimensies toegepast zijn.
De uitkomsten van deze groepering zijn van *voorlopige* aard daar een definitieve uitspraak over de inpasbaarheid pas gegeven kan worden als het inwendige van een of meerdere zoutvoorkomens in een eventuele volgende fase is onderzocht.
4. Van de thans onderscheiden zoutlichamen liggen er waarschijnlijk 23 te diep om door subglaciale erosie, in combinatie met zoutstijging en erosie door rivieren, in de komende 100.000 jaar te worden beïnvloed, terwijl 9 zoutvoorkomens wel door subglaciale erosie in de komende 100.000 jaar zouden kunnen worden aangesneden. Voor 7 zoutvoorkomens is de onzekerheid in de basisgegevens te groot om een conclusie te trekken. Voor 6 voorkomens is de evaluatie helemaal niet mogelijk omdat een deel van de relevante gegevens ontbrak.
Afwijkingen van een vergelijkbare groepering in het project Vervolg GEO-1 zijn veroorzaakt door het gebruik van nieuwe kaartinformatie en het in de groepering betrekken van de onzekerheden in de dieptewaarden.
Deze groepering is alleen op geologische overwegingen gebaseerd en doet *géén* uitspraak over de consequenties in veiligheidstechnische zin. Daarvoor is een samenhangende en meer complete benadering vereist. De uiteindelijke betekenis van ijstijdeffecten voor de veiligheid van opgeborgen radioactief afval kan pas worden vastgesteld als de aangereikte geologische overwegingen in een toekomstige veiligheidsstudie geanalyseerd zijn.
5. Een alternatieve methode voor de inpassing van opbergontwerpen is uitgewerkt om de geologische gegevens beter bruikbaar te maken voor de mijnbouwkundige inpassing. De methode komt er op neer dat met behulp van een computerprogramma uit de diepte- en dikte-gegevens betreffende het Zechstein via een aantal stappen de geometrie en de grootte van het beschikbare opbergvolume kan worden bepaald. Meer mijnbouwkundige informatie en nauwkeurige geologische gegevens betreffende het Zechstein in het gehele onderzoeksgebied zijn echter nodig om de inpasbaarheid van de opbergontwerpen in Nederlandse zoutstructuren, op basis van de geometrie en de grootte van het beschikbare opbergvolume, verder te kunnen uitwerken.

Referenties

OPLA Commissie (1989). Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Eindrapport Fase 1. Uitgave: Ministerie van Economische zaken, Den Haag.

Remmelts, G. & E.J.TH. Duin (1990). Results of a regional deep seismic survey in The Netherlands. In: B. Pinet & C. Bois (red.). The potential of deep seismic profiling for hydrocarbon exploration. Editions Technip, Paris. p. 335-343.

Rijks Geologische Dienst (1984). Inventarisatie van slechtdoorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vasteland. Deel 1, 2, 3. Rapport 6.009.

Rijks Geologische Dienst (1988). Aut.: M.C. Geluk & A.F.B. Wildenborg. Geologische inventarisatie en ontstaansgeschiedenis van zoutvoorkomens in Noord- en Oost-Nederland. Rapportnr 10568, project GEO-1, OPLA Fase 1.

Rijks Geologische Dienst (1990). Aut.: A.F.B. Wildenborg, E.F.J. de Mulder, J.H.A. Bosch, R. Hillen, F. Schokking & K. van Gijssel. Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar. Rapportnr. 30010, project Vervolg GEO-1, OPLA Fase 1.

Rijks Geologische Dienst (1990). Toelichting bij de Geologische kaart van Nederland 1:50.000, kaartblad 12. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (1991). Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad I Vlieland-Terschelling. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (1991). Nadere ordening van zoutstructuren ex fase 1 met de nadruk op (peri-)glaciale verschijnselen in de komende 100.000 jaar. Rapport 30.010.

Rijks Geologische Dienst (1992). Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad II Ameland-Leeuwarden. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (in druk a). Geologische kaart van Nederland 1:50.000, kaartblad 28 Oost/29. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (in druk b). Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad III Rottumeroog-Groningen. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Rijks Geologische Dienst (in druk c). Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad V Sneek-Zwolle. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Schokking, F., A. Lokhorst & M.C. Geluk (1992). Geological framework for planning the use of the underground in the Netherlands. In: L.L. Boyer (red.). Proceedings of the 5th International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Structures, Delft. p. 76-89.

Van Hattum & Blankevoort (1986). Lokatie-onafhankelijke studie inzake aanleg, bedrijfsvoering en afsluiting van mogelijke faciliteiten voor de definitieve opberging van radioactief afval in steenzoutformaties in Nederland. Van Hattum & Blankevoort, Beverwijk.

Bijlage A
Tussenrapporten uitgebracht in het project GEO-1A

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: A. Ruizendaal & E.K. Ruijs. Nadere analyse betrouwbaarheid van (hydro-)-geologische gegevens. Rapportno. 30.101/TRA1, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1991). Aut.: E.K. Ruijs & K. van Gijssel. Optimalisatie van bestaande (hydro-)geologische databestanden op basis van gegevens uit het onderzoeksgebied Noordoost-Nederland. Rapportno. 30.102/TRA2, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst & Dronkert Gooskens Research (1992). Aut.: H. Dronkert (DGR) & G. Remmelts (RGD). Variabiliteit hydrogeologische parameters in Mesozoïsche eenheden - Invloed van zoutstrukturen op Mesozoïsche gesteenten binnen het Nederlandse continentale plat. Rapportno. 30.103A/TRA3A, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: L. Bos. (Hydro)geologische karakteristieken van breuken. Rapportno. 30.103B/TRA3B, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1991). Aut.: D.J. van Rees & G. Remmelts. Structureel-geologische ontwikkeling van zoutstructuren in algemene zin - Aanvullende literatuurstudie. Rapportno. 30.104/TRB1, project GEO-1A, OPLA Fase 1.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: G. Remmelts & D.J. van Rees. Structureel-geologische ontwikkeling van zoutstructuren in de Noord-Nederland en het Nederlandse deel van het continentale plat. Rapportno. 30.105/TRB2, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: D.J. van Rees. Berekening van stijgsnelheden van zoutstructuren. Rapportno. 30.106/TRB3, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: W.H. Zagwijn, G.H.J. Ruegg & P. Cleveringa. Reconstructie paleohydrologische randvoorwaarden in het Noordnederlandse OPLA gebied - Tijdsafhankelijke geologische gegevens over de laatste 160.000 jaar. Rapportno. 30.107/TRB4, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst & Geosense (1993). Aut.: J.H. Baker (Geosense), G.Th. Klaver & M.C. Geluk. Genesis and evolution of caprock - Evidence from the Zuidwending salt diapir. Rapportno. 30.108/TRB5, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: Th.A.M. de Groot, J.W.H. Janssen & M.W. van den Berg. Erosie in samenhang met verticale bodembewegingen en zeespiegelschommelingen. Rapportno. 30.109/TRB6, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: J.J. van Dijke & J.W.H. Janssen. Subglaciale erosie in samenhang met de opbouw van de ondergrond. Rapportno. 30.110/TRB7, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1993) Aut.: P.J.T. Steins, A. Ruizendaal & A.F.B. Wildenborg. Overzicht van kenmerken van de Nederlandse zoutvoorkomens, inpasbaarheid van opbergontwerpen en verwachte toekomstige geologische stabiliteit. Rapportno. 30.111/TRB8, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: G. Th. Klaver. Natuurlijke analogons van radionuclidenmigratie. Rapportno. 30.112/TRB9, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1992). Aut.: M.C. Geluk. Verslag stationering geoloog RGD bij BGR ten aanzien van opberging radioactief afval in Gorleben/Morsleben. In-situ onderzoek aan zoutstructuren. Rapportno. 30.113/TRB10, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2016

Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: E. Muyzert & G. Remmelts. The modelling of salt diapirism. Rapportno. 30.114/TRC1, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: A.H. Damman. Process- and modelling studies of subrosion. Rapportno. 30.115/TRC2, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: A. Veldkamp & J.J. van Dijke. Modelstudie van (subglaciale) erosie. Rapportno. 30.116/TRC3, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1991). Aut.: A. Ruizendaal. Tijdsafhankelijke geologische modellen - Voorlopige literatuurstudie ten behoeve van een te maken keuze. Rapportno. 30.117A/TRC4A, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: A. Ruizendaal, P.J.T. Steins & E.K. Ruijs. Tijdsafhankelijke geologische modellering - Haalbaarheidsstudie. Rapportno. 30.117B/TRC4B, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Rijks Geologische Dienst (1993). Aut.: M.A. Goossens. De opzet van een OPLA datasysteem voor aardwetenschappelijke gegevens. Rapportno. 30.012/TRDS, project GEO-1A, OPLA Fase 1A.

Colofon

© 1993 Copyright Rijks Geologische Dienst,
Staat der Nederlanden

Behoudens uitzondering door de Wet gesteld mag zonder toestemming van de rechthebbende op het auteursrecht niets uit deze publikatie worden verveelvoudigd en/of gepubliceerd, tenzij op duidelijke wijze de bron wordt vermeld.

Uitvoering
Rijks Geologische Dienst,
Project Management Toegepaste Geologie,
Richard Holkade 10, Postbus 157,
2000 AD Haarlem

Projectmanager
Dr E.F.J. de Mulder

Plaatsvervangend projectmanager
Drs A. Lokhorst

Projectleider
Dr A.F.B. Wildenborg

Deelprojectleiders
Drs M.C. Geluk, drs Th.A.M. de Groot, drs G. Remmelts

Projectuitvoerders
Dr J.H. Baker (Geosense), ir M.W. van den Berg, drs L.J. Bos, dr A.H. Damman, drs J.J. van Dijke, dr H. Dronkert (DGR), drs M.C. Geluk, dr M.A. Goossens, drs Th.A.M. de Groot, drs J.W.H. Janssen, dr G. Th. Klaver, drs E. Muyzert, ir A.N.M. Obdam, drs D.J. van Rees, drs G. Remmelts, drs E.K. Ruijs, drs A. Ruizendaal, C.C. de Ruyter, drs P.J.T. Steins, dr ir A. Veldkamp, dr A.F.B. Wildenborg

Adviseurs/assistentie
E. Back, Th. de Beer, ing. E. Berendse, dr J.N. Breunesse, drs L. Dijkshoorn, C.M. Elmers-Kathman, drs M.H. Giesen, drs K. van Gijssel, T.A. Goudsmit, ing. P.H.W. ten Have, ing. A. Hoogendoorn, drs P.T.J. Kok, E.Y Lamboo, dr R.J.W. van Leeuwen, L. Linnartz (Licosoft), N.G. Neele, N. Parker-Witmans, dr J.J.F. Ramaekers, J. Reijs

Redactie
Dr H.A. van Adrichem Boogaert, dr J.H. Baker (Geosense), drs E.J.T. Duin, drs P. Jongerius, dr G.Th. Klaver, drs A. Lokhorst, drs C.S. Mesdag, dr H.M. van Montfrans, dr E.F.J. de Mulder, ir A.N.M. Obdam, drs H.J.M Pagnier, dr ir A. Veldkamp, dr F.M. van der Wateren

Vertaling samenvatting
Thema Geologica

Vormgeving en reproductie
Ontwerp
J.A.M. Bruinenberg
Uitvoering
Ing. E. Berendse, ing. E. Boermans (Polec), C.V.M. van Houten (SINE), A.H. Koers, B.I. Kromkamp, O.T. Souisay, Studio M&M Heemskerk

Subsidiegever
Ministerie van Economische Zaken
Subsidienummer: MEFIS 52927

Uitgebracht bij briefnummer 934889, d.d. 26 november 1993, aan het Ministerie van Economische Zaken

Collectie Stichting Laka
www.laka.org
Gedigitaliseerd 2018