

Eindrapport

multidisciplinair onderzoek

naar de relatie tussen

gaswinning en aardbevingen

in Noord-Nederland

november 1993

Voorwoord

Dit rapport is samengesteld door de Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen. Het bevat de resultaten van een onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen in Noord-Nederland. De Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen, in het vervolg aangeduid als “de commissie”, heeft hiermee voldaan aan de opdracht als vastgelegd in de instellingsbeschikking van de Ministers van Economische Zaken en van Verkeer en Waterstaat, van 1 oktober 1991 (Staatscourant 190).

De commissie heeft de conclusies van dit rapport, een aanbeveling over het gebruik van boorgatseismometers en de schatting van het seismisch risico in Noord-Nederland in een brief aan de genoemde Ministers aangeboden tegelijk met het rapport.

Samenvatting

Dit rapport geeft een overzicht van de resultaten van het multidisciplinaire onderzoek naar de oorzaak van een aantal recente aardbevingen in Noord-Nederland. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Ministers van Economische Zaken en van Verkeer en Waterstaat. De studie richtte zich op twee doelen. Enerzijds is nagegaan of er een relatie bestaat tussen gaswinning en aardbevingen, anderzijds is onderzocht of het registreren van aardbevingen kan worden verbeterd door seismometers in een boorgat te plaatsen. Het onderzoek heeft twee jaar geduurd, van oktober 1991 tot oktober 1993. Verschillende instituten hebben in opdracht van de commissie meegewerkt: de Technische Universiteit Delft, Grondmechanica Delft en de Vrije Universiteit van Amsterdam. Het KNMI heeft naast het onderzoek op het gebied van de seismologie de projectleiding verzorgd. Het onderzoek werd begeleid door een commissie: de 'Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen'. Deze commissie is verantwoordelijk voor de inhoud van dit rapport.

De TU-Delft en Grondmechanica Delft hebben door middel van rekenmodellen het effect nagebootst van veranderingen op het spanningsveld en de daarmee samenhangende bewegingen in de diepe ondergrond ten gevolge van gaswinning. Het uitgangspunt hierbij was het gasveld "Eleveld". Van dit veld zijn goede aardbevingsregistraties voorhanden. De modelstudies hebben aangetoond, dat gaswinning verschuivingen langs breuken in het reservoir en de directe omgeving teweeg kan brengen. Deze verschuivingen kunnen onder bepaalde omstandigheden leiden tot voelbare aardbevingen. In situaties waarbij er in de omgeving van het gasveld breukzones voorkomen die onder kritische spanning staan, kan gaswinning daar ook een aardbeving "triggeren". De modelberekeningen wijzen uit dat de energie die bij de aardbevingen vrijkomt aan een bovengrens gebonden is. Op grond hiervan wordt geconcludeerd, dat de maximaal te verwachten sterkte van dergelijke aardbevingen ongeveer 3 op de schaal van Richter bedraagt.

Alle bevingen, die sinds 1986 in het noorden zijn geregistreerd, zijn gebruikt voor een bepaling van de maximaal te verwachten magnitude. Deze seismische analyse leidt tot een bovengrens van 3,3 op de schaal van Richter, hetgeen goed overeenstemt met de uitkomsten van de modelstudies.

Bij Finsterwolde is door het KNMI een proef uitgevoerd met seismometers in een boorgat. Aanvankelijk werden er ruismetingen verricht. Uit de metingen bleek, dat de boorgatseismometers aanzienlijk gevoeliger konden worden afgesteld dan seismometers aan de oppervlakte. Tijdens het ruisexperiment zijn de detectoren aangesloten op apparatuur voor continue registratie. Deze apparatuur registreerde in de periode van juli 1992 tot en met augustus 1993 veertien kleine aardbevingen, waarvan twee door de bevolking zijn gevoeld.

Tot nu toe hebben de noordelijke bevingen, voor zover bekend, geen schade aan gebouwen veroorzaakt. De uitkomsten van het multidisciplinaire onderzoek geven aan, dat als gevolg van de maximaal te verwachten aardbeving, zelfs in het ongunstigste geval, slechts een kleine kans bestaat op lichte schade in een beperkt gebied rond het epicentrum.

Summary

This report gives an overview of the results of a multi-disciplinary study concerning the causes of a number of recent earthquakes in the northern part of the Netherlands. The study was commissioned by the Ministers of Economic Affairs and of Transport and Public Works.

The study had two aims. First, to ascertain whether these earthquakes had a connection to gas extraction, and secondly, to examine whether the registration of earthquakes could be improved by the use of borehole seismometers. The study took two years, from October 1991 to October 1993. Several research institutes were involved: Delft University of Technology, Delft Geotechnics and the Free University in Amsterdam. The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), was responsible for the research on the subject of seismology. The project management, as well, was carried out by the KNMI. A committee, the "Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen", had the supervision and is responsible for the contents of this report.

Using model calculations, Delft University and Delft Geotechnics simulated the effects of gas extraction on the change of stress fields and the related movements at depths up to approximately 3 km. The Eleveld gasfield was selected as the main site for the study, since a number of well-documented earthquakes took place in that area. The model studies provided plausible evidence that gas extraction can cause movement along fault planes in the reservoir rock. Under certain conditions, this movement produces perceptible earthquakes. If faults under critical stress are present in the vicinity of a gasfield, gas extraction may also trigger an earthquake. The calculations show that the energy released by an earthquake during the settling process has an upper limit. It was concluded from modelling that the maximum magnitude to be expected of such an earthquake is about 3 on the Richter scale.

All earthquakes recorded in the northern part of the Netherlands since 1986 were included in an analysis to determine the maximum earthquake. This produced an upper limit of 3,3 on the Richter scale, which fits in quite well with the results of the modelling studies.

An experiment was conducted at the village of Finsterwolde using seismometers placed in a borehole. Initially, noise measurements were carried out. These showed that borehole seismometers produce readings less noise-disturbed than seismometers placed at the surface. During the experiment, the detectors were connected to permanent recording equipment. From July 1992 to August 1993 inclusive, 14 minor tremors were recorded, of which only two were felt by people living nearby.

None of the earthquakes recorded in the northern part of the Netherlands has, to our knowledge, caused any material damage to buildings. The results of the multidisciplinary study indicate that as a result of the maximum earthquake even under most unfavourable conditions there is only a small chance of slight damage occurring in a limited area around the epicenter.

Inhoud

1 Inleiding

- 1.1 Voorgeschiedenis 10
- 1.2 Doel van het multidisciplinaire onderzoek 10
- 1.3 Opzet en inhoud van het onderzoek 10
- 1.4 Taak van de commissie 11
- 1.5 Samenstelling van de commissie 11
- 1.6 Werkwijze van de commissie 11
- 1.7 Structuur van het rapport 11

2 Achtergronden seismologie

- 2.1 Aardbevingen 12
- 2.2 Seismiciteit Nederland 12
- 2.3 Seismische stations 14
- 2.4 Berekeningen aan seismogrammen 15
- 2.5 Bodemruis 16
- 2.6 Gevolgen van aardbevingen 16

3 Algemene geologie Noord-Nederland

- 3.1 Inleiding 18
- 3.2 Geologische geschiedenis 18
- 3.3 Het ontstaan van fossiele brandstoffen 21
- 3.4 De vervorming van steenzout 22
- 3.5 Het spanningsveld 23

4 Geomechanische aspecten van gaswinning

- 4.1 Spanningsleer voor materialen met inwendige wrijving 26
- 4.2 Geologie en geomechanica 28
- 4.3 Gaswinning en geomechanica 29
- 4.4 Breukvorming, slip en zoutgedrag 31

5 Seismologie Noord-Nederland

- 5.1 Seismiciteit Noord-Nederland 34
- 5.2 Haardvlak oplossing Eleveld 38
- 5.3 Bepaling maximale magnitude voor Noord-Nederland 38
- 5.4 Magnitude-intensiteit relatie Noord-Nederland 40
- 5.5 Schade als gevolg van aardbevingen in Noord-Nederland 40
- 5.6 Boorgatseismometer Finsterwolde 41
- 5.7 Ruismetingen 42

6 Geologisch model van het gasveld Eleveld

- 6.1 Algemene gegevens 44
- 6.2 Lithologie en geomechanische eenheden 44

7 Geomechanische modelberekeningen Eleveld

- 7.1 Inleiding en probleemstelling 50
- 7.2 Beschrijving gasveld Eleveld 50
- 7.3 De initiële situatie 51
- 7.4 Effect van gaswinning in de directe omgeving van het reservoir 53
- 7.5 Effect van gaswinning in de wijde omgeving van het reservoir 55

8 Analyse en interpretatie van aardbevingen in Noord-Nederland

- 8.1 Inleiding 60
- 8.2 Geofysische methoden 60
- 8.3 De Noordnederlandse aardbevingen 61
- 8.4 Analyse van individuele aardbevingen in Noord-Nederland 62

9 Conclusies en aanbevelingen

- 9.1 Conclusies 67
- 9.2 Aanbeveling 67

10 Referenties

- 10.1 Literatuurverwijzingen 69
- 10.2 Rapporten 69
- 10.3 Selectie geraadpleegde literatuur 70

11 Bijlagen

- 11.1 Beschikking Staatscourant no. 190 73
- 11.2 Voortgangsrapportage multidisciplinair onderzoek 74
- 11.3 Lijst van participanten 76

1 Inleiding

1.1 Voorgeschiedenis

Sinds 1986 worden met enige regelmaat lichte aardbevingen waargenomen in de noordelijke provincies. Het eerst in december 1986 in Assen, gevolgd door een beving bij Hooghalen in 1987. Omdat de oorzaak van deze bevingen niet duidelijk was, besloot het Ministerie van Economische Zaken een netwerk van seismometers door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) te laten plaatsen rond Assen. Dit netwerk kwam eind 1988, begin 1989 tot stand. Eind 1989 vond een derde beving plaats, niet in Drenthe, maar in Noord-Holland bij Purmerend. Direct daarna werd een begin gemaakt met het opzetten van een diepgaand onderzoek. De voorbereidingen voor dit onderzoek vergden veel tijd. Door het geringe aantal waargenomen aardbevingen bleek het moeilijk om goede aanknopingspunten te vinden.

In 1991 werden in Drenthe vier bevingen geregistreerd, waarvan twee in het centrum van het Asser netwerk. Deze bevingen brachten nieuwe gegevens aan het licht, waardoor het onderzoeksprogramma meer concreet kon worden ingevuld. In juni 1991 is het onderzoeksprogramma ter kennisneming aan de Tweede Kamer gezonden (Aanhangsel nr. 597 van de Handelingen der Tweede Kamer, vergaderjaar 1990-1991).

Het onderzoek is daadwerkelijk gestart in oktober 1991. De totale duur van het onderzoek werd vastgesteld op 2 jaar. Het KNMI was bereid de projectleiding te verzorgen. De begeleiding van het onderzoek kwam in handen van een commissie van deskundigen. De taak van deze commissie werd vastgelegd in een ministeriële beschikking, zie bijlage 1.

1.2 Doel van het multidisciplinaire onderzoek

Het multidisciplinaire onderzoek heeft in de eerste plaats tot doel na te gaan of er een relatie bestaat tussen gaswinning en aardbevingen, en zo ja welke de achtergronden van dat verband zijn. In de tweede plaats heeft het onderzoek tot doel een ruisexperiment uit te voeren met seismometers in een boorgat, om aardbevingen beter te registreren.

1.3 Opzet en inhoud van het onderzoek

Het onderzoek is opgebouwd uit vijf deelprojecten. Twee projecten zijn gebaseerd op een computersimulatie van de effecten van het gaswinningsproces in de diepe ondergrond. Het ene project is uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft (TUD), faculteit Mijnbouwkunde en Petroleumwinning (onder leiding van ir. J.P.A. Roest), het andere door Grondmechanica Delft (GD) (onder leiding van prof.dr.ir. F.B.J. Barends). De TUD heeft door middel van een

rekenmodel de spanningsveranderingen nagebootst, die in en direct rondom een gasveld optreden als er gas aan de ondergrond wordt onttrokken. Grondmechanica Delft heeft met een ander model gerekend aan de spanningsveranderingen tot 10 km van het gasveld verwijderd. Twee andere deelprojecten hebben vooral geologische en geomechanische gegevens opgeleverd. Deze gegevens zijn gebruikt bij de eerdergenoemde computerberekeningen. Het Instituut voor Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit van Amsterdam, heeft (onder leiding van dr. H.R. Rondeel) de boorgatmetingen van een groot aantal olie- en gasboringen in Noord-Nederland bewerkt om een indruk te krijgen van de grootte en de richting van het spanningsveld in de ondergrond van de noordelijke provincies. Daarnaast zijn er geologische profielen vervaardigd door de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) en de Rijks Geologische Dienst (RGD). Het vijfde deelproject betreft het ruisexperiment met boorgatseismometers. Hiervoor werd bij Finsterwolde een put geboord van 300 m diepte. In deze put is een reeks detectoren aangebracht voor het meten van seismische signalen. Aanvankelijk werden er incidenteel ruismetingen verricht. Naderhand zijn de detectoren aangesloten op apparatuur voor continue registratie. Dit project is uitgevoerd door het KNMI.

1.4 Taak van de commissie

De taak van de commissie is vastgelegd in de instellingsbeschikking (Staatscourant no. 190). Deze taak bestaat uit vier onderdelen. In de eerste plaats het inhoudelijk begeleiden en afstemmen van de vijf deelonderzoeken. Ten tweede het verwerken van de resultaten in een rapport. Ten derde het beoordelen van de gevolgen van aardbevingen voor bouwwerken. En tenslotte het doen van aanbevelingen aangaande het gebruik van een seismografisch netwerk in Noord-Nederland.

1.5 Samenstelling van de commissie

De 'Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen' telt vijf leden: Dr. A.R. Ritsema (voorzitter) voormalig hoofd van de afdeling Geofysisch Onderzoek van het KNMI; de heer H.J. Gussinklo, petrofysicus, hoofd van de afdeling Bodemdaling van de Nederlandse Aardolie Maatschappij; dr. H.W. Haak, seismoloog, hoofd van de afdeling Seismologie van het KNMI; drs. A. Lokhorst, geoloog, werkzaam bij de Rijks Geologische Dienst; ir. J.J.E. Pöttgens, hoofdinspecteur Geotechniek van het Staatstoezicht op de Mijnen. Door het Ministerie van Economische Zaken werd de heer J.M. van Herk, beleidsmedewerker bij het Directoraat-Generaal voor Energie, als secretaris toegevoegd.

1.6 Werkwijze van de commissie

De commissie heeft vanaf het begin van het onderzoek getracht zoveel mogelijk gebruik te maken van de kennis binnen de onderzoekswereld en de olie- en gasindustrie. Om die reden heeft de commissie regelmatig "workshops" georganiseerd, waarbij met onderzoekers van gedachten werd gewisseld over de resultaten van het lopende onderzoek. Tevens stelde de commissie twee werkgroepen in: een geomechanische en een geologische werkgroep. De deskundigen in deze groepen volgden de deelonderzoeken op de voet en gaven daar zoveel mogelijk sturing aan. Enkele maanden na de start van het onderzoek heeft de commissie de oliemaatschappij Elf Petroland in het onderzoek betrokken, vanwege de specifieke kennis van haar Franse moedermaatschappij op het gebied van geïnduceerde aardbevingen. De contactpersoon bij Elf Petroland was ir. R.H. Camphuysen. In het najaar van 1992 heeft Elf Petroland de commissie in staat gesteld van gedachten te wisselen met haar meest ervaren deskundigen, alsmede met onderzoekers van de Universiteit van Grenoble.

In oktober 1992 bracht de commissie een tussenrapport uit aan de Ministers van Economische Zaken en van Verkeer en Waterstaat. Dit rapport geeft een overzicht van de resultaten tot dat moment, zie bijlage 2.

In maart 1993 werden gesprekken gevoerd met Duitse deskundigen, die een ruime ervaring hebben met geïnduceerde bevingen ten gevolge van kolenwinning.

1.7 Structuur van het rapport

Dit rapport geeft eerst een algemene inleiding over seismologische, geomechanische en geologische begrippen. Dit zijn de hoofdstukken 2 (Achtergronden seismologie), 3 (Algemene geologie Noord-Nederland) en 4 (Geomechanische aspecten van gaswinning). Vervolgens wordt ingegaan op de meer specifieke resultaten van het onderzoek. In hoofdstuk 5 (Seismologie Noord-Nederland) wordt beschreven welke aardbevingen geregistreerd zijn en welke de gevolgen zijn geweest van deze bevingen. Ook komt aan de orde welke uitspraken er gedaan kunnen worden over te verwachten bevingen, hun sterkte en eventueel daaruit voortvloeiende schade aan gebouwen. Hoofdstuk 6 (Geologisch model van het gasveld Eleveld) behandelt de geologie en de geomechanische eigenschappen van dit veld. Deze gegevens zijn gebruikt in de modelstudies die verder zijn uitgewerkt in hoofdstuk 7 (Geomechanische modelberekeningen Eleveld). In hoofdstuk 8 (Analyse en interpretatie van aardbevingen in Noord-Nederland) wordt vooruitlopend op de conclusies het totaal van de probleemstelling besproken. Het rapport eindigt met een lijst van conclusies en een aanbeveling.

2 Achtergronden seismologie

2.1 Aardbevingen

Een natuurlijke aardbeving ontstaat door een schoksgewijze beweging in het vaste gesteente van de aarde, de lithosfeer, als gevolg van een plotselinge ontlading van spanning. Door de voortdurende langzame beweging van delen van de aardkorst ten opzichte van elkaar kunnen zich in het gesteente spanningen ophopen. De geleidelijke aardkorstbewegingen worden veroorzaakt door langzame stromingen in de mantel van de aarde. Bevingen die op deze wijze ontstaan worden tektonische aardbevingen genoemd. De plotselinge verplaatsingen in het gesteente treden op langs breukvlakken die deel uitmaken van regionale of lokale geologische breuksystemen.

Andere typen aardbevingen zijn het gevolg van vulkanische activiteit en van instorting van onderaardse holle ruimten. Ook door menselijke activiteiten zoals mijnbouw, aanleg van stuwmeren en vloeistofinjectie of vloeistof(gas)extractie in de ondergrond, kan de spanningstoestand van het gesteente lokaal veranderen. Zo kunnen in de ondergrond aanwezige breuken worden geactiveerd, wat zich kan manifesteren als een meestal lichte aardbeving.

Voor deze laatste categorie bevingen worden de begrippen geïnduceerde en getriggerde aardbevingen gehanteerd. Hoewel in de literatuur het onderscheid niet altijd even scherp wordt toegepast betekent in dit rapport “geïnduceerd” dat de energie die vrijkomt volledig wordt bepaald door menselijk ingrijpen bijvoorbeeld door de gaswinning. Wanneer door menselijk toedoen een aardbeving wordt geactiveerd waarbij de energie die vrijkomt voornamelijk wordt bepaald door natuurlijke tektonische processen, worden deze bevingen met het begrip “getriggerd” aangeduid.

De trillingen die ontstaan bij een aardbeving planten zich in alle richtingen door de aarde voort in de vorm van elastische golven. Er zijn diverse typen elastische golven die zich met verschillende snelheden voortplanten. De voornaamste zijn longitudinale of P-golven (P van primair), transversale of S-golven (S van secundair) en oppervlaktegolven. De trillingen kunnen afhankelijk van de sterkte van de beving en de afstand tot het hypocentrum, de haard van de aardbeving, worden gehoord, gevoeld en door seismometers worden geregistreerd.

2.2 Seismiciteit Nederland

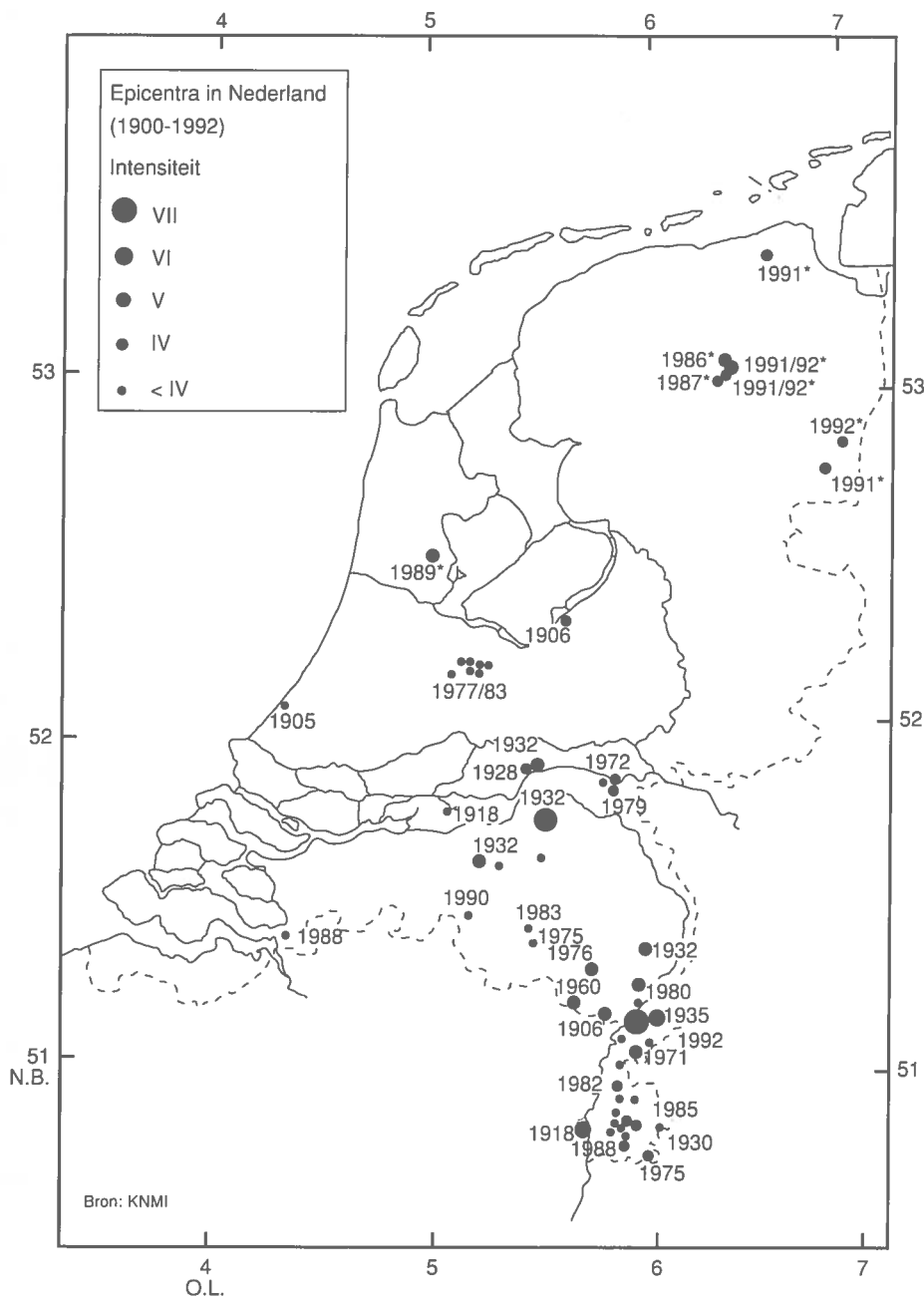
Aardbevingen in Nederland, en in Nederland gevoelde aardbevingen met epicentra buiten de landsgrenzen, zijn bijeengebracht in de “Catalogus Aardbevingen in Nederland”, een uitgave van het KNMI (Houtgast, 1991). Uiteraard is de catalogus verre van volledig, met name voor de vroege

historie tot het eind van de Middeleeuwen. Naarmate het gaat om recentere tijden wordt de catalogus completer.

Aardbevingen komen in Nederland vooral voor in Brabant en Limburg. De historische meldingen uit Noord-Nederland in de catalogus zijn met name door hun context, waarin tegelijk van storm en overstromingen gesproken wordt, als een melding van aardbeving ongeloofwaardig. Noord-Nederland is altijd beschouwd als aseïsmisch dat wil zeggen dat er geen aardbevingen van betekenis zijn voorgekomen. Hier staat tegenover dat in verschillende gebieden op aarde sterke natuurlijke bevingen bekend zijn in gebieden die voorheen als aseïsmisch werden aangemerkt.

In figuur 1 zijn de epicentra weergegeven voor de periode 1900-1992. Deze periode is compleet voor magnitudes $M > 4$ op de schaal van Richter. Vanaf 1950 is het bestand compleet voor magnitudes $M > 3$. Het verschil tussen de seïsmiciteit van Noord- en Zuid-Nederland is evident. Deze conclusie vindt tevens aansluiting bij de situatie in Noord-Duitsland.

De aardbevingen die sinds 1986 in Noord-Nederland zijn opgetreden vormen een significant contrast met het verleden.

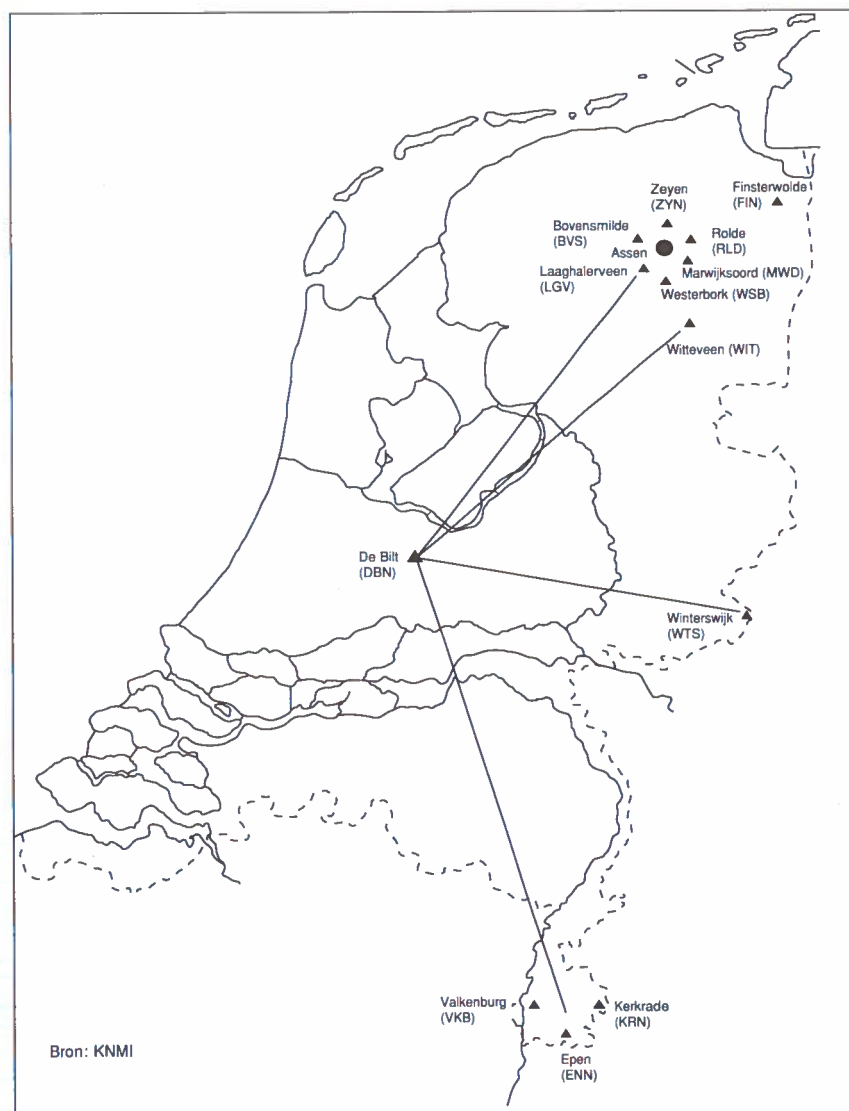


figuur 1: Epicentra van Nederlandse aardbevingen in de periode van 1900-1992. De epicentra gemerkt met een sterretje (*) liggen in de omgeving van producerende gasvelden.

2.3 Seismische stations

De instrumentele registratie van aardbevingstrillingen, de microseismische waarnemingen, geschiedt met verschillende typen seismometers. Voor het meten van de trillingen met hoge frequenties nabij de haard van de aardbeving wordt gebruik gemaakt van kortperiodische seismometers. De trillingen met lage frequenties, die vooral op grotere afstand goed tot ontwikkeling komen, worden door langperiodische seismometers opgetekend. Het spectrum van aardbevingsgolven strekt zich uit over een breed gebied van ongeveer 0,001 Herz tot 100 Herz. Voor de registratie van de volledige bodembeweging en van de diverse soorten seismische golven (longitudinale, transversale ruimtegolven en oppervlaktegolven) is het noodzakelijk om per waarnemingspunt te beschikken over een set van drie seismometers voor twee horizontale richtingen NZ en OW en de verticale richting. De opgevangen signalen worden

electronisch bewerkt tot gegevensbestanden waaruit ze vervolgens weer kunnen worden omgezet tot elk gewenst (analoog) seismogram. Digitale seismische signalen kunnen via datacommunicatie netwerken eenvoudig uitgewisseld worden. Wanneer seismometers op afgelegen plaatsen niet direct aan een computer voor dataverwerking kunnen worden aangesloten, is telefonische transmissie van het seismometer-sigitaal een noodzakelijke tussenstap. Het KNMI maakt van deze technieken gebruik voor de seismische stations in De Bilt, Witteveen, Winterswijk, Epen, Valkenburg, Kerkrade, rond Assen en bij Finsterwolde. De stations zijn aangegeven in figuur 2. Een voorbeeld van een seismogram is gegeven in figuur 3.



figuur 2: Seismische stations van het KNMI. De stations zijn continu, 24 uur per dag, via telefoonlijnen verbonden met het station De Bilt.

2.4 Berekeningen aan seismogrammen

Op een seismogram, de registratie van een aardbeving, worden seismische golven opgetekend, die zich bij een aardbeving vanuit de haard met verschillende snelheden verspreiden. Dit zijn de primaire of P-golf, de secundaire of S-golf, die beide de aarde kunnen doorkruisen en de oppervlaktegolven. Uit registraties van een aardbeving in verschillende stations kunnen tijdstip, plaats, diepte, sterkte en mechanisme van de beving worden berekend.

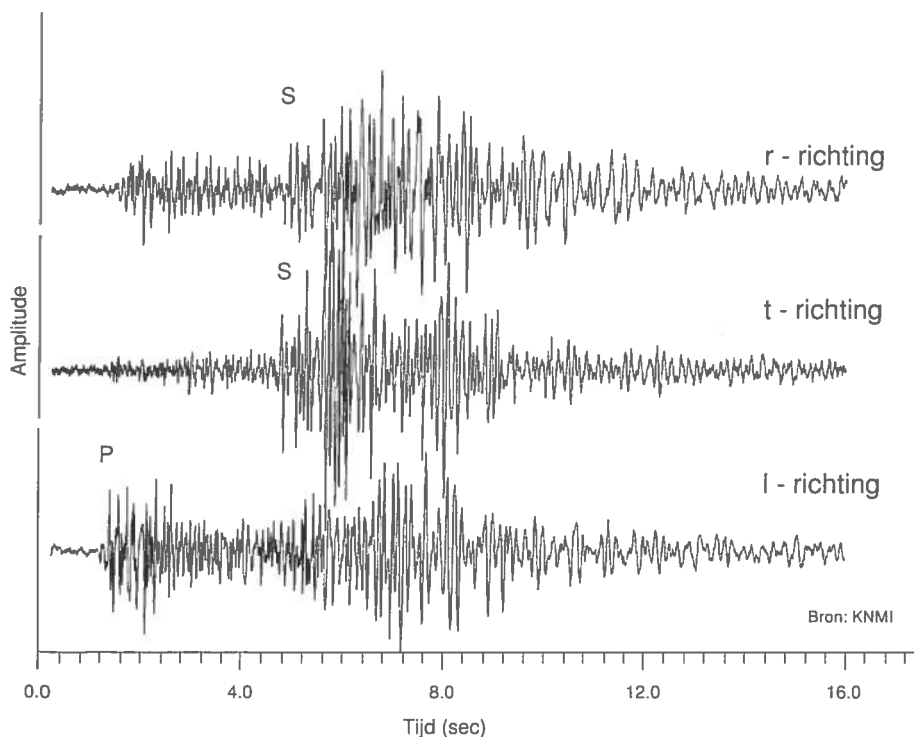
Het epicentrum van een aardbeving is de plaats aan het aardoppervlak recht boven de haard van de beving. Deze haard, die op een zekere diepte ligt, wordt het hypocentrum genoemd. Voor de bepaling van het tijdstip van de beving en het hypocentrum (epicentrum en diepte) zijn registraties van tenminste vier seismische stations nodig wanneer uitsluitend gebruik gemaakt wordt van de aankomsttijden van P-golven. De nauwkeurigheid van de berekening hangt af van de nauwkeurigheid waarmee de aankomsttijden van de seismische golven gemeten kunnen worden en van de nauwkeurigheid waarmee de voortplantingssnelheid van seismische golven bekend is; het snelheidsprofiel. De snelheid van seismische golven zal over het algemeen toenemen met de diepte. De nauwkeurigheid van hypocentrum-berekeningen kan toenemen wanneer meer gegevens beschikbaar zijn. De dieptebepaling vertoont doorgaans de grootste onnauwkeurigheid.

De sterkte van een aardbeving wordt uitgedrukt in de magnitude (op de schaal van Richter) of met de waarde van het seismisch moment. De magnitude M is een maat voor de hoeveelheid energie, die bij een aardbeving vrijkomt in de vorm van seismische trillingen, en wordt bepaald aan de hand van de amplitude en de periode van de seismische golven. Hierbij wordt gecorrigeerd voor de afstand tussen het epicentrum en het seismische station, omdat seismische golven energie verliezen naarmate de afgelegde afstand groter wordt. Deze afstand wordt bijvoorbeeld bepaald uit het verschil in aankomsttijd van de P- en S-golf.

De seismoloog Richter heeft als eerste de bovenstaande methode uitgewerkt, en heeft daarmee zijn naam aan de magnitudeschaal verbonden. Later zijn ook andere methodes toegepast om de magnitude van een aardbeving te bepalen.

Omdat de kracht van aardbevingen zeer uiteenlopende waarden kan aannemen, is de schaal van Richter logaritmisch. Een factor 10 in amplitude van seismische golven of een factor 30 in energie komt dan overeen met één magnitude-eenheid, een factor 100 in amplitude of 900 in energie met twee magnitude-eenheden.

Het seismisch moment, het spanningsverval tijdens de beving, het breukoppervlak en de verschuiving langs het breukvlak kunnen worden berekend met het veel gebruikte model van Brune (1970). De gegevens voor dit model worden bepaald uit het seismogram en uit de mechanische eigenschappen van het gesteente rondom het hypocentrum.



figuur 3: Seismogrammen van een aardbeving bij Slochteren op 11 december 1992 geregistreerd door het station Finsterwolde met seismometers op een diepte van 300 meter. Door samenstelling van drie seismogrammen in horizontale en verticale richtingen (x, y, z) zijn drie nieuwe seismogrammen berekend in longitudinale, radiale en transversale richtingen (l, r, t). Dit maakt de identificatie van S-golven en oppervlaktereфлекties eenvoudiger.

Het seismisch moment is de betrouwbaarste seismische parameter voor de sterkte van een aardbeving, deze wordt berekend uit de frequentiespectra van een aardbeving. Het is de maat voor de verandering van de krachtenkoppels tijdens de beving en is afhankelijk van het breukoppervlak, de gemiddelde verschuiving langs het breukvlak en de stijfheid van het breukmateriaal.

Het haardmechanisme van een beving geeft aan in welke richting het gesteente aan weerszijden van de betrokken breuk verschoven is. Voor de bepaling van het haardmechanisme zijn seismogrammen van tenminste zes stations met een goede geografische spreiding nodig. Doorgaans wordt alleen de eerste beweging van de P-golf gebruikt, hoewel tegenwoordig daartoe ook het hele digitale signaal gemodelleerd kan worden.

2.5 Bodemruis

Een complicerende factor bij de meting van seismische signalen is de bodemruis. Het is de continue beweging van het aardoppervlak en de ondergrond door natuurlijke oorzaken (het weer) en kunstmatige bronnen (industrie, verkeer). De intensiteit van deze bodemruis kan in sterke mate uiteenlopen. Zo is de amplitude van de bodemruis in De Bilt gemiddeld meer dan een factor 100 sterker dan in Zuid-Limburg. Aan deze variatie liggen twee oorzaken ten grondslag. In de eerste plaats de nabijheid van versturende bronnen zoals industrie, verkeer, golfslag op zee en luchtdrukvariaties door wind. In de tweede plaats speelt de geologische opbouw van de bodem een belangrijke rol. Het is bekend dat weinig compacte geologische lagen zoals recent afgezette sedimenten in dit verband ongunstig zijn. Dit laatste verklaart in hoofdzaak de verschillen in bodemruis tussen Zuid-Limburg en Noord-Nederland.

In de seismologie zijn een aantal methoden bekend om bodemruis te reduceren. In de eerste plaats kan de locatie van de seismograaf zo worden gekozen dat de invloed van ruisbronnen zo gering mogelijk is. Wanneer de seismografen in een netwerk gegroepeerd zijn, is de vrijheid een geschikte locatie te vinden niet al te groot door beperkingen die de configuratie van het netwerk aan de plaatsing oplegt.

Een tweede methode om ruis te beperken is een aantal seismografen op een beperkt oppervlak te plaatsen en de signalen van deze instrumenten bij elkaar op te tellen. Met deze seismische arrays, die naast een reductie van de bodemruis ook andere voordelen bieden, kan maximaal een factor $\sqrt{N}$ ruisreductie gewonnen worden. N is het aantal opgestelde instrumenten.

Een derde veel toegepaste methode om ruis te reduceren is de plaatsing van een seismometer in een boorgat op een zekere

diepte, bijvoorbeeld 100 of 300 meter onder het aardoppervlak. De fysische achtergrond van de reductie in bodemruis is gelegen in het feit dat de meeste ruisbronnen hun energie uitzenden in de vorm van seismische oppervlaktegolven en veel minder in de vorm van longitudinale en transversale golven. Een karakteristieke eigenschap van oppervlaktegolven is dat de amplitude van de trillingen exponentieel afneemt met de diepte onder het aardoppervlak. Voor de detectie van kleine aardbevingen in het frequentiegebied van 1 Hz tot 50 Hz kan over het algemeen worden volstaan met boorgaten tot dieptes van 300 meter. Hoewel diepere boorgaten experimenteel uitgetest zijn, weegt de te verwachten ruisreductie vaak niet meer op tegen de sterk verhoogde kosten van aanleg.

In het kader van deze studie zijn seismometers geplaatst in een boorgat bij Finsterwolde. Aanvankelijk was het doel bodemruis op verschillende dieptes tot 300 meter te meten. Later zijn deze seismometers ingezet voor een permanente registratie van aardbevingen.

Omdat in de seismologie de ruis die door de instrumentatie zelf wordt gegenereerd meestal verwaarloosbaar is, vormt de bodemruis de bepalende factor voor de detectiegrens van een seismograaf. De detectiegrens van een seismografisch systeem is de grens in kilometers waarbinnen een aardbeving van een zekere magnitude nog net door de seismograaf van de ruis onderscheiden wordt. Onderzoek aan de seismometers van het netwerk rond Assen heeft bijvoorbeeld aangetoond dat een aardbeving die plaatsvindt binnen dit netwerk met een kracht van 1,7 op de schaal van Richter nog net geregistreerd wordt. Deze waarde is aan de praktijk getoetst in het geval van een kleine aardbeving bij Geelbroek op 24 mei 1992 met een kracht van 1,6 op de schaal van Richter. Het feit dat deze beving iets kleiner was dan de detectiegrens kan worden verklaard uit het feit dat de ruis ook in de tijd aanzienlijk kan variëren naar gelang de weersomstandigheden en de mate van menselijke activiteit. Dit laatste komt vooral tot uiting in een behoorlijk ruisverschil tussen de werkuren overdag en de uren tijdens de nacht en in het weekend.

2.6 Gevolgen van aardbevingen

De gevolgen van aardbevingen in de vorm van de veranderingen in het landschap, de mate waarin de beving door personen wordt gevoeld en de schade aan bouwwerken worden als macroseismische verschijnselen aangeduid. De gevolgen worden beschreven in een twaalfdelige intensiteitsschaal. De twee meest gebruikte schalen zijn de vrijwel identieke Modified Mercalli intensiteitsschaal van 1931 en de MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik) intensiteitsschaal van 1964. De schalen worden met enige regelmaat bijgesteld, bijvoorbeeld om aan de gevolgen van

veranderende bouwwijze tegemoet te komen. Zo is in 1992 voor Europa de European Macroseismic Scale (EMS) ingevoerd. Deze schaal is in dit rapport gebruikt.

In het algemeen worden de hevigste verschijnselen waargenomen in het epicentrale gebied boven de haard van de aardbeving. De kracht van de beving, de berekende magnitude volgens de schaal van Richter, is echter lang niet altijd bepalend voor de effecten van een beving aan het aardoppervlak. Factoren als diepte van de aardbevingshaard (wereldwijd variërend van 0-700 km, in Nederland van 0-30 km), geologische structuur, geomechanische eigenschappen van de bodem en de aard van de bouwconstructies zijn van grote invloed op de uiteindelijke gevolgen van een aardbeving. Ook speelt de tijdsduur van de bodembewegingen een rol, doordat resonantieverschijnselen kunnen optreden. Zo kan soms op enige afstand van het epicentrum meer en andersoortige schade optreden dan in het epicentrale gebied zelf. De relaties tussen intensiteit enerzijds en haarddiepte, epicentrale afstand en bodemversnelling anderzijds, zijn vanwege de grote lokale verschillen onnauwkeurig en worden vaak empirisch bepaald.

3 Algemene geologie Noord-Nederland

3.1 Inleiding

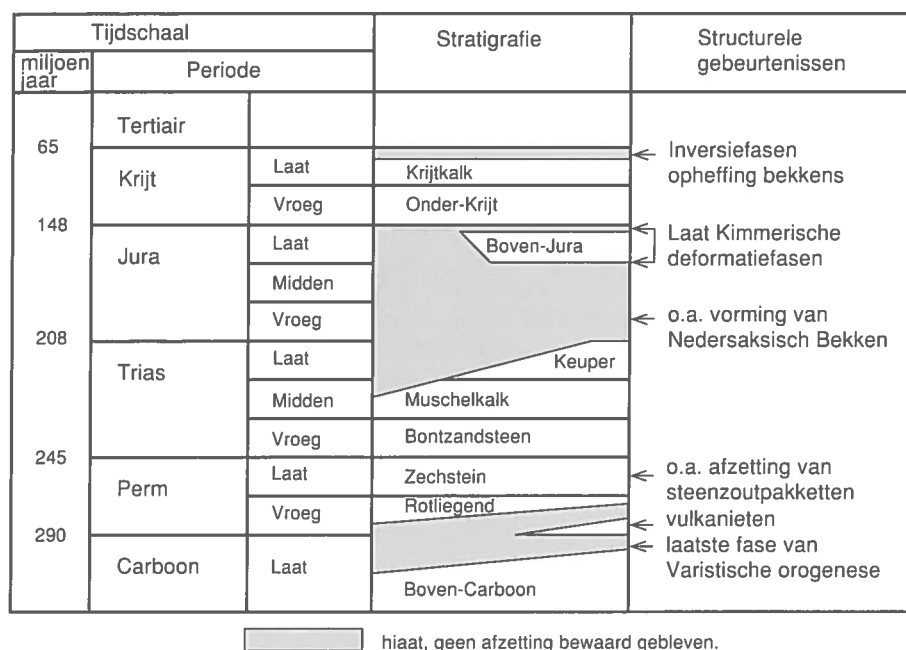
In dit hoofdstuk wordt na een kort overzicht van de belangrijkste geologische processen, de geschiedenis van Noordoost-Nederland vanaf het Laat-Carboon, ongeveer 300 miljoen jaar geleden, beschreven. Enige aandacht is besteed aan het ontstaan en voorkomen van olie en gas, alsmede het voorkomen van steenzout. Tevens wordt ingegaan op de natuurlijke spanningen in de ondergrond. Aan dit laatste aspect is een afzonderlijke studie gewijd. Immers de heersende spanning in de ondergrond is een belangrijke parameter in modelstudies. Naast de presentatie van de onderzoeksresultaten van het spanningsveld dient dit hoofdstuk vooral als geologische achtergrondinformatie voor het uitgevoerde mechanisch modelonderzoek.

3.2 Geologische geschiedenis

De geologische geschiedenis wordt door meerdere factoren bepaald, waaronder spanningen in de aardkorst, zeespiegelschommelingen en klimaatsveranderingen.

Spanningen in de aardkorst vallen uiteen in twee groepen, te weten rek- en drukspanningen. Bij verandering van deze spanningen treedt vervorming van de ondergrond op, waarbij met name zwaktezones in een gebied een grote rol spelen. In de geologische geschiedenis van een gebied kan worden waargenomen dat bepaalde delen zich onderscheiden in bewegingsgedrag. Deze gebieden worden structurele elementen genoemd. De ordening van de structurele elementen geeft het structurele raamwerk. Rekspanningen geven in het algemeen een daling en dientengevolge sedimentatie te zien, terwijl drukspanningen zullen leiden tot opheffing en daaraan gerelateerde erosie. Het is bij de bepaling van de reactie van de structurele elementen op spanningen in de aardkorst van belang hoe de richting van de maximale spanning is ten opzichte van de oriëntatie van de zwakte-zones. Als de maximale rek- of drukspanningsrichting hier loodrecht op staat, zal slechts daling of opheffing te zien zijn. Vaker komt het echter voor, dat deze richting hier niet loodrecht op staat. Er zullen dan ook horizontale bewegingen plaatsvinden, die het beeld van de vervorming complex maken.

Zeespiegelschommelingen zijn een relatief begrip, en kunnen zich uiten in een daling (regressie) of een stijging (transgressie) van het zeeniveau. Een regressie leidt tot een terugtrekken van de zee en kan tot gevolg hebben dat een oorspronkelijk open marien milieu verandert in een kustnabij of een continentaal afzettingsmilieu. In samenhang met een lage stand van de zeespiegel kan er tevens erosie optreden. Een transgressie kan er toe leiden dat het omgekeerde plaatsvindt. In de praktijk is het niet altijd mogelijk een scheiding te maken tussen de gevolgen van



figuur 4: schematisch overzicht van voorkomende gesteenten en hun ouderdom.

Bron: RGD

spanningsveranderingen in de aardkorst en zeespiegelschommelingen. De zeespiegelschommelingen zijn voor een deel het gevolg van tektonische spanningsveranderingen, maar voor een deel ook van klimatologische fenomenen zoals het optreden van ijstijden. Ijstijden kenmerken zich door een lage gemiddelde temperatuur op aarde. Een grote hoeveelheid water op aarde wordt in ijskappen en gletschers opgeslagen, waardoor het zeeniveau daalt. In interglacialen met een relatief hoge temperatuur smelt een deel van het ijs. Er is weinig water opgeslagen in de ijskappen en de zeespiegel heeft een hoge stand.

Klimaatveranderingen, welke tijdens de geologische geschiedenis opgetreden zijn, worden in grote lijnen aan de "drift der continenten" toegeschreven. De aardkorst is opgebouwd uit een aantal schollen, deels overeenkomend met de continenten, die zich ten opzichte van elkaar bewegen. Als gevolg hiervan treden de hiervoor besproken rek- en druk-spanningen op binnen deze platen. Waar platen elkaar ontmoeten vormen zich gebergtes, terwijl waar platen uit elkaar drijven, de zogenaamde spreidingszones, oceanen ontstaan. Nederland ligt niet op een dergelijke contactzone, maar ondanks dit feit wordt de geologische geschiedenis van Nederland toch sterk bepaald door de gebeurtenissen langs deze contactzones. Door het bewegen van deze platen kent een specifiek gebied in de loop der tijd verschillende klimaten. Zo is de plaat waar Nederland op ligt vanuit een positie ten zuiden van de evenaar steeds verder noordwaarts gedreven, waardoor het klimaat veranderde van een tropisch klimaat gedurende het Carboon tot het gematigde klimaat van dit moment. Een overzicht van de geologische perioden is weergegeven in figuur 4.

Carboon

Deformatie tijdens het Laat-Carboon resulteerde in een oost-west strekkende gebergtegordel. Ten noorden van dit gebergte bevond zich een groot bekken met uitgestrekte moerasgebieden. Onder invloed van het heersende vochtige tropische klimaat ontstond in de moerassen een uitbundige vegetatie. Hierdoor bestaat een deel van het Carboon-gesteente uit organisch materiaal, waaruit door latere inkoling steenkool en aardgas zijn ontstaan, zie paragraaf 3.3. De laatste fase van de Varistische orogenese (gebergtevorming) leidde tot grootschalige plooiing en opheffing van het bekken gevolgd door erosie.

Perm

De oudste afzettingen van het Perm in Noord-Nederland bestaan uit vulkanische gesteenten, gerelateerd aan de vorming van noord-zuid gerichte slenken in het noorden van Duitsland en Nederland. Afkoeling van de, door de gebergtevorming en het vulkanisme enigszins opgewarmde aardkorst, leidde in het Laat-Perm tot een regionale daling. Als gevolg van de zeer droge klimaatsomstandigheden ontstond een grote woestijnvlakte die ten noorden van het huidige Waddenzee-gebied overging in een groot zout woestijnmeer. Vanuit het gebergte vormden zich rivieren en wadi's die het schaarse water en daarmee het sediment afvoerden naar het woestijnmeer. De passaatwinden transporteerden een deel van de zandige afzettingen naar de gebieden tussen de rivieren, waar zich duinen vormden. Deze duinafzettingen vormen het belangrijkste reservoirsteente voor gas in Nederland: de Slochteren zandsteen (Rotliegend). Op de uitloper van het gebergte, waarop een groot deel van Drenthe lag, vond echter geen sedimentatie plaats. Alleen in het noordwesten van Drenthe worden grofkorrelige en

conglomeratistische zandafzettingen gevonden, die door rivieren afgezet zijn.

Aan het begin van het Laat-Perm ontstaat er een verbinding via een nauwe zeestraat met de oceaan waardoor het bekken in korte tijd volstroomt en de zogenaamde Zechsteinzee zich vormt. Gedurende perioden met een lage zeespiegelstand valt de verbinding echter gemakkelijk droog. De sedimenten van de Zechstein Groep vormen opeenvolgende indampingsfasen van het bekken.

Trias

De Zechstein zee is aan het einde van het Perm helemaal drooggevallен. De klastische sedimenten van de triassische Onder-Bontzandsteen Formatie worden afgezet, vrijwel geheel bestaand uit kleisteen. In de loop van het Vroeg-Trias vindt opnieuw deformatie en erosie plaats, daarnaast worden in de lager gelegen delen fluviatiele en lacustriene sedimenten afgezet. Gedurende de Midden-Trias periode worden de afzettingen van de Röt- en de Muschelkalk Formatie gevormd. De mariene kalksteen pakketten worden afgewisseld met evaporieten, ontstaan tijdens enkele fasen van indamping. Tijdens de Laat-Trias keert het continentale milieu terug en worden de kleiige, anhydritische lagen van de Keuper afgezet. Aan het einde van het Trias treedt opnieuw erosie op.

Jura

Een sterke stijging van de zeespiegel aan het begin van de Jura periode zorgt ervoor dat grote gebieden van Noordwest-Europa onder de zeespiegel komen te liggen. Zwart gekleurde, mariene, deels bitumineuze schalies worden afgezet (Altena Groep). In het Midden-Jura vindt na afzetting van riviersedimenten een fase van opheffing en erosie plaats waardoor sedimenten uit het Midden-Jura slechts op enkele plaatsen bewaard zijn gebleven. Aan het begin van het Laat-Jura voltrekt zich een nieuwe sterke deformatiefase, de zogenaamde Laat-Kimmerische. Deze deformatie is gepaard gegaan met halokinetische bewegingen van de Permische zoutafzettingen, zie paragraaf 3.4.

Met name deze deformatiefase bepaalt het huidige breukenpatroon, met een dominante NW-ZO richting, in de ondergrond, zie figuur 5. Als gevolg van bewegingen en deformaties in de aardkorst ontstonden verschillende bekkens en hogen, waaronder het Nedersaksisch Bekken. Het gasveld Eleveld ligt aan de noordrand van dit bekken. Op de hogen vindt sterke erosie plaats; hierdoor is op deze plaatsen een groot deel van de sedimentaire opeenvolging verdwenen.



figuur 5: Breukenkaart basis Zechstein in Noordoost-Nederland. Van Zuidoost-Friesland en Midden-Drenthe zijn vooralsnog geen samenvattende overzichtskaarten beschikbaar.



figuur 6: Breukenkaart Basis-Tertiair in Noordoost-Nederland. De breuken geven overwegend slenken weer die samenhangen met zoutstructuren.

Krijt

Aan het begin van het Krijt treedt een transgressie op. De geleidelijke overgang naar een steeds uitgestrektere zee komt tot uiting in de verandering van afzettingen van ondiepe mariene Vlieland zandsteen, naar de open mariene klei en mergel van de Holland Formatie. In het inmiddels vrijwel geheel Noordwest-Europa bedekkende mariene bekken wordt voornamelijk mergel en kalk afgezet van de Krijtkalk Groep. Het relatief rustige grootschalige dalingsproces van Noordwest-Europa wordt aan het einde van het Krijt verstoord door de botsing tussen het Afrikaanse en Europese continent. Hierdoor worden bestaande breuken (afschuivingen) in tegengestelde richting gereactiveerd (opschuivingen), zodat lokale hogen worden gevormd op plaatsen waar in de Jura bekkens bestaan. Deze tektonische fase uit zich ook in een versterkte zoutvloed, die gedurende het Tertiair actief blijft. Figuur 6 toont het breukpatroon aan de basis van het Tertiair. Dit patroon is voornamelijk bepaald door de zoutvloed.

Tertiair en Kwartair

De Tertiaire sedimenten zijn de erosieprodukten van de Alpen opgeheven gebieden. Van het Paleoceen tot het Plioceen zijn zanden en kleien onder mariene omstandigheden afgezet. Belangrijke erosiefasen vinden plaats tijdens het Vroeg-Oligoceen en nabij de overgang Oligoceen-Mioceen. Als gevolg van deze erosiefasen ontbreken delen van de Tertiaire afzettingen. In het Plioceen begint de verlanding van het onderhavige gebied.

3.3 Het ontstaan van fossiele brandstoffen

Fossiele brandstoffen bestaan uit koolwaterstoffen die ontstaan door chemische omzetting van organische bestanddelen. Olie ontstaat uit de omzetting van phytoplankton (o.a. algen) terwijl gas ontstaat of direct uit plantaardig materiaal, of door verdere omzetting van aardolie. De olie die bij Schoonebeek wordt gewonnen is gevormd in de Vroeg-Jura Posidonia Schalie. De moerasafzettingen van het Carboon die zeer rijk zijn aan plantaardig materiaal zijn een typisch gas-moedergesteente. Factoren die bij het ontstaan van olie en gas een rol spelen zijn tijd en druk, maar vooral temperatuur. Olie ontstaat wanneer de temperatuur lang genoeg tussen de 60° en 120°C is gelegen, voor aardgas moet de temperatuur tussen de 120° en 225°C zijn geweest. Wanneer olie lang wordt verwarmd, zal het tenslotte overgaan in gas. Daar de temperatuur regelmatig oploopt met de diepte (ca. 2,6°C per 100 m) is het verklaarbaar waarom het olie- of gasmoedergesteente eerst diep moet zijn begraven voordat er koolwaterstoffen kunnen ontstaan.

Niet al het gas en de olie die wordt gevormd is ook winbaar. Daarvoor moet het in grote hoeveelheden tezamen voorkomen. Eenmaal gegenereerd hebben de relatief lichte koolwaterstoffen de neiging naar boven te stromen. Dit wordt migratie genoemd. Hiervoor maken zij gebruik van permeabele (doorlatende) gesteentelagen zoals zandstenen en van breuken in de ondergrond. Deze migratie duurt voort tot

dat een ondoorlatend gesteente de weg verspert. In dat geval hopen de koolwaterstoffen zich op in de poriën van het onder deze afsluitende laag aanwezige gesteente. Er ontstaat zodoende een gas- of olieveld. Voor deze zogenaamde reservoirgesteenten komen met name poreuze zandstenen of kalken in aanmerking. In Nederland is dit o.a. de Slochteren Zandsteen (Perm), waarin het Groningen gasveld voorkomt. Daarnaast is met name in Drenthe de Zechstein 2 Carbonaat een belangrijk reservoirgesteente.

3.4 De vervorming van steenzout

Steenzout is een opmerkelijk gesteente. Onder Noordoost-Nederland komen tientallen kussens en pijlers van steenzout voor die honderden meters tot kilometers hoog kunnen zijn. Zij hebben de bovenliggende gesteente pakketten omhoog gedrukt of doorbroken. Dit spectaculaire geologische fenomeen is mogelijk doordat zout een aantal karakteristieke eigenschappen bezit anders dan het omgevende gesteente.

Ten eerste heeft steenzout de eigenschap dat het gemakkelijk plastisch vervormbaar is. Een tweede eigenschap van steenzout is dat het een van de lichtste gesteenten is (dichtheid $2,1 \text{ g/cm}^3$).

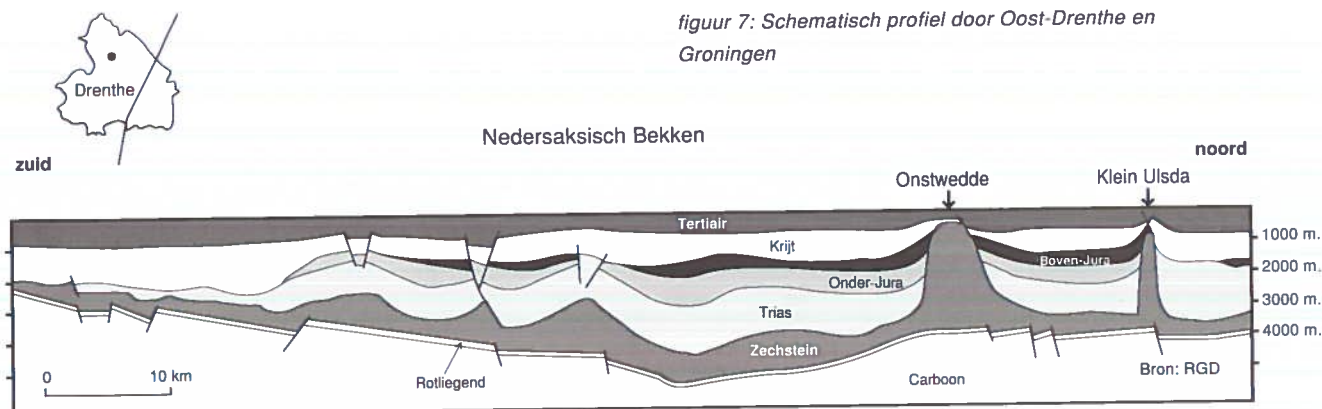
De sedimenten die het zout in Noordoost-Nederland bedekken, bestaan uit zand-, klei- en kalksteen. Deze gesteenten zijn zwaarder, ongeveer $2,6\text{-}2,7 \text{ g/cm}^3$. Het resultaat is een dichtheidsomkering: een situatie waarbij een licht gesteente wordt bedekt door een zwaarder gesteente. Het zout krijgt hierdoor als het ware de neiging om te drijven, en heeft de neiging om door het afdekpakket heen op te stijgen. In het ideale geval, waarbij een homogene zoutlaag van constante dikte bedekt wordt door een zwaardere homogene laag van sedimenten, eveneens van constante dikte, heerst er een labiel evenwicht. Deze eigenschap van het zout komt alleen dan tot uiting wanneer dit evenwicht wordt verstoord. Deze verstoring kan ontstaan wanneer op de zoutlaag niet overal dezelfde druk wordt uitgeoefend. Dit is

bijvoorbeeld het geval wanneer een zoutlaag wordt scheef gesteld of wanneer door een breuk een deel van de zoutlaag dieper komt te liggen waardoor er een grotere sedimentlast op komt te rusten. Het zout zal vanuit het diepere deel, met een zwaardere bedekking, naar het ondiep gelegen deel van het zoutpakket vloeien, waar de druk van het afdekpakket het kleinste is. Dit verklaart waarom zoutstructuren vaak verbonden zijn aan breuken, of langs de randen van bekkens voorkomen.

In een zoutlaag treedt in eerste instantie voornamelijk horizontale zoutvloeit op, waardoor een breed kussenvormig lichaam ontstaat. Het zout wordt onttrokken aan de omgeving waardoor in dat gebied de afdekkende gesteenten inzakken. In deze zogenaamde primaire randsynclines worden dikke pakketten sedimenten afgezet terwijl boven het kussen het tegenovergestelde het geval is. Wanneer de zoutvloeit doorgaat wordt het kussen steeds meer geprononceerd en steiler. Het afdekkende pakket wordt daardoor steeds verder uitgerekt en zal uiteindelijk breken. Vanaf dat moment spreekt men van een zoutdiapier (diapirein is Grieks voor doorbreken). Bij een zoutdiapier of zoutpijler heeft het zout hoofdzakelijk een verticale bewegingsrichting en wordt het zout voornamelijk aan het eigen kussen onttrokken. Hierdoor ligt de bij deze, secundaire, fase behorende randsyncline dicht tegen de diapier aan.

De zoutstructuren die in de ondergrond van Noordoost-Nederland voorkomen bestaan allen uit Zechstein zout. Er blijkt bovendien vrijwel zonder uitzondering een relatie te bestaan met een breuk in het gesteente onder het Zechstein. Door beweging langs deze breuken zijn de afdekpakketten aan weerszijde van de breuk verschillend in dikte waardoor de zoutvloeit op gang is gebracht. De stijgsnelheden zijn zeer gering en liggen rond de $0,1 \text{ mm}$ per jaar.

Figuur 7 laat een noord-zuid profiel door Oost-Drenthe en Groningen zien. Het meest in het oog springend is natuurlijk



figuur 7: Schematisch profiel door Oost-Drenthe en Groningen

de zoutvloeï die naast een aantal zoutkussens tot twee grote diapieren heeft geleid bij Onstwedde en Klein Ulsda. Boven het zout is een dik pakket Trias sedimenten afgezet, gevolgd door de Jura sedimenten. Deze laatste zijn niet over het gehele profiel aanwezig als gevolg van erosie aan het begin van het Laat-Jura maar vooral door erosie aan het begin van het Krijt (Laat-Kimmerische fase). De verdikking van de Boven-Jura afzettingen in de directe omgeving van de diapieren, vooral bij Onstwedde toont aan dat de diapire fase tijdens deze periode begon. Uit dit profiel blijkt niet zo duidelijk wanneer het kussenstadium bereikt is, maar andere informatie wijst in de richting van het Trias. Het pakket Krijt afzettingen is in het zuiden van het profiel het dikst. Dit is het gevolg van de inversiefasen aan het einde van het Krijt en gedurende het Vroeg-Tertiair. Voorts zijn boven de zoutstructuren kleine slenken zichtbaar. Deze kunnen veroorzaakt zijn doordat de afdekkende sedimenten over de kruin van de structuur worden uitgerekt, of door instorting als gevolg van oplossing van het zout onder het sedimentpakket. Tenslotte blijkt dat veel van de breuken die onder het zout zijn gevormd, niet doorzetten in de sedimenten erboven. Dit is het gevolg van de plastische eigenschappen van het zout. Wel is duidelijk dat er een relatie bestaat tussen de lokatie van de breuken in de ondergrond en de lokatie waar de zoutstructuren ontstaan.

3.5 Het spanningsveld

Nederland bevindt zich in een tektonisch spanningsveld opgelegd door grootschalige processen die met de ontwikkeling van het gehele Europese continent samenhangen. De hieruit voortkomende intra- en interplaat spanningen zijn op wereldschaal in kaart gebracht binnen het World Stress Map project (Zoback et al. 1991).

De spanningstoestand in de aardkorst, de spanning, wordt beschreven door een zogenaamde spanningsellipsoïde. Deze vertoont drie loodrecht op elkaar staande hoofd-normalspanningsassen. In de bovenste delen van de aardkorst, zeker binnen de eerste paar kilometers, is één van deze assen verticaal georiënteerd, zodat de twee andere assen in het horizontale vlak liggen. Eén van beide is dan de grootste horizontale hoofdspanning, de ander de kleinste.

De spanning is opgebouwd uit een viertal bijdragen. De belangrijkste hiervan, zeker op enige diepte in de korst, is direct gebonden aan de zwaartekracht. Het betreft het gewicht van het bovenliggende gesteentepakket en de daaruit voortvloeiende horizontale spanningen. De tweede bijdrage is de tektonische spanning die in verband staat met de processen van recente plaattektoniek. Hiertoe behoren ook de intraplaatspanningen. De derde bijdrage betreft thermo-elastische spanningen als gevolg van temperatuurwisselingen; op enige diepte in de Noordwesteuropese korst

worden deze spanningen relatief onbelangrijk geacht. Als laatste zijn er relictspanningen als gevolg van vroegere tektonische en of thermische gebeurtenissen. De spanning is meetbaar met behulp van een groot aantal, indirecte meetmethoden, waaronder de analyse van zgn. "breakouts" in boorgaten. Voor de Nederlandse situatie is deze methode de meest geschikte. Het gaat er daarbij om dat boorgaten onder invloed van lokale spanningen een ellipsvormige doorsnede kunnen krijgen met de langste as loodrecht op de richting van de grootste horizontale spanning. Langs één as treden geëlongeerde zones op door het openbreken van het gesteente aan tegenover elkaar liggende zijden van het boorgat als gevolg van spanningsconcentraties en daarmee samenhangende breukvorming. Breakoutvorming wordt gekarakteriseerd door een toename van de diameter van het boorgat in één richting, terwijl de diameter in de richting loodrecht daarop over het algemeen niet of nauwelijks verandert. Breakoutrichtingen vertonen een grote mate van consistentie, gerelateerd aan de richtingen van de hoofdnormalspanningen.

De kleinschalige, vaak gecompliceerde opbouw van Noordwest-Europa is geen gunstig uitgangspunt voor een uniforme spanningsoriëntatie. Toch geven in-situ spanningsmetingen met verschillende methodieken uitgevoerd in gesteenten van verschillende ouderdom en verschillende mechanische eigenschappen en tektonische bouwstijl, een opvallend uniforme NW-ZO oriëntatie van de maximale horizontale hoofdspanning. Deze uniformiteit geeft aan dat lokale spanningsverschillen als gevolg van inhomogeniteiten in de korst en als gevolg van relictspanningen, nauwelijks de resultaten beïnvloeden. Deze NW-ZO richting kan daarom verondersteld worden de richting van het recente tektonische spanningsveld aan te geven.

In de Nederlandse situatie wordt meerdere malen waargenomen dat een boorgat gekenmerkt wordt door een tweetal loodrecht op elkaar staande breakouts. Opvallend is hier het zeer regelmatig optreden van breakoutrichtingen evenwijdig aan de te verwachten maximale horizontale spanningsrichting. Een zo regelmatig voorkomen in vrijwel alle stratigrafische eenheden is waarschijnlijk het gevolg van het geringe verschil in grootte tussen de kleinste en de grootste horizontale spanning. Het kleine verschil in grootte tussen de horizontale spanningen is beschreven in Becker en Palladini (1990) die voor Noord- en Midden-Europa spanningskaarten hebben samengesteld.

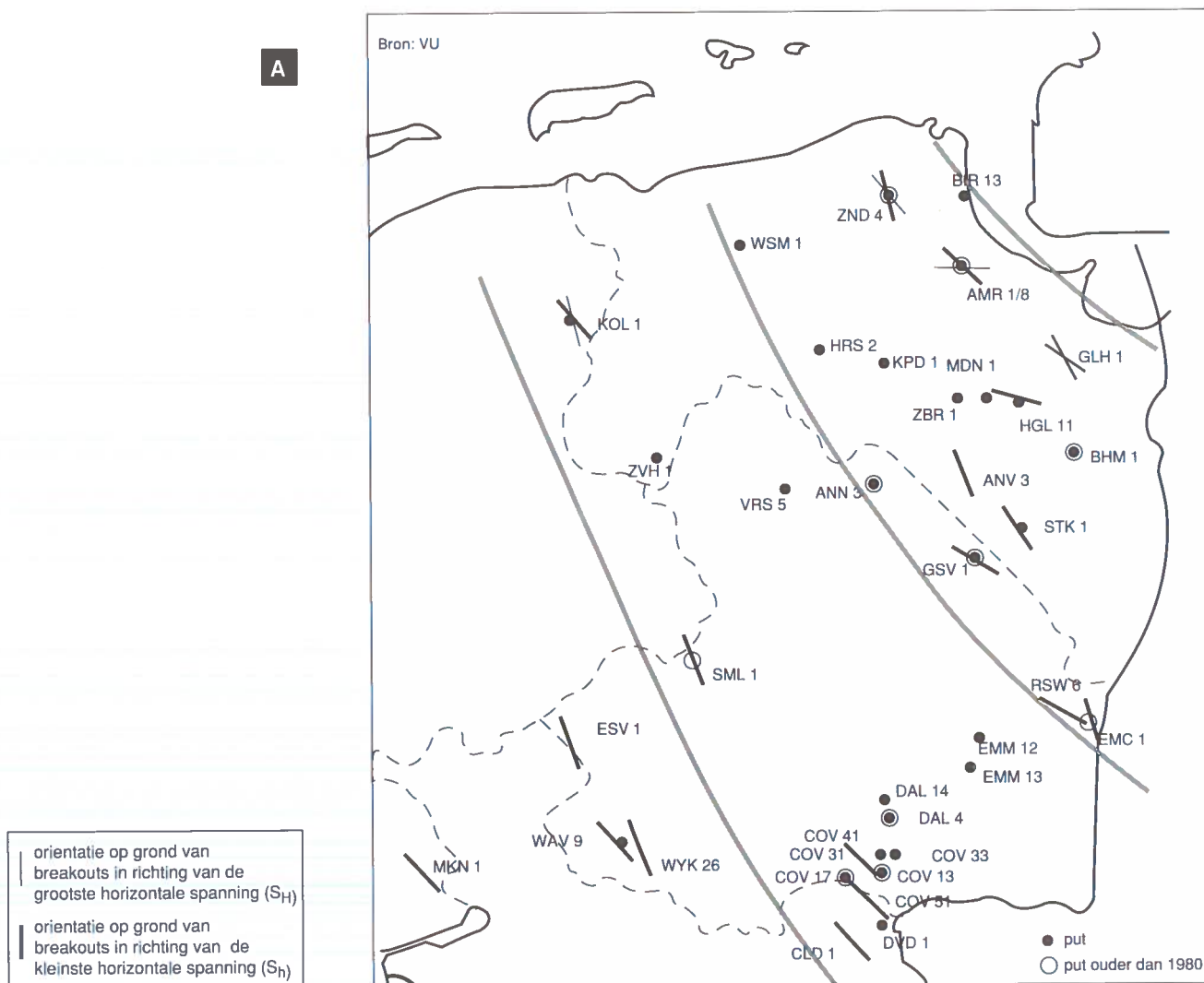
Een van de belangrijkste conclusies van het onderzoek naar de in-situ spanning is dat de maximale horizontale spanning op grond van gegevens uit alle onderzochte niveaus - een tot nu toe gebruikelijke methode - ook over een relatief klein gebied als Noordoost-Nederland een kleine richtingsverandering doormaakt van NNW-ZZO oriëntatie (N150E) in het noorden naar een NW-ZO oriëntatie (N130E) in het

zuiden. De gemiddelde spanningsrichting van N140E graden is dus niet voor de hele regio dezelfde, zie figuur 8A.

Verder is gebleken dat richtingen van de breakouts in de Limburg Groep niet overeenkomen met die in de bovenliggende gesteentepakketten. Het is mogelijk dat deze afwijkende oriëntatie toegeschreven kan worden aan relictspanningen. Als indicator voor de richting van het huidige tektonische spanningsveld zullen daarom de stratigrafische niveaus boven de Limburg Groep beter geschikt zijn. Zij tonen een grootste horizontale hoofdspanningsrichting, die varieert van N160E in het noorden van

Groningen naar N140E in het zuiden van Drenthe, met een algemeen gemiddelde van N160E (zie figuur 8B). De hele trend is iets noordelijker gericht dan die in de Limburg Groep die een gemiddelde oriëntatie vertoont van N125E. De maximale horizontale spanning bezit derhalve geen uniforme oriëntatie wat betreft de geografische locatie en het stratigrafisch niveau.

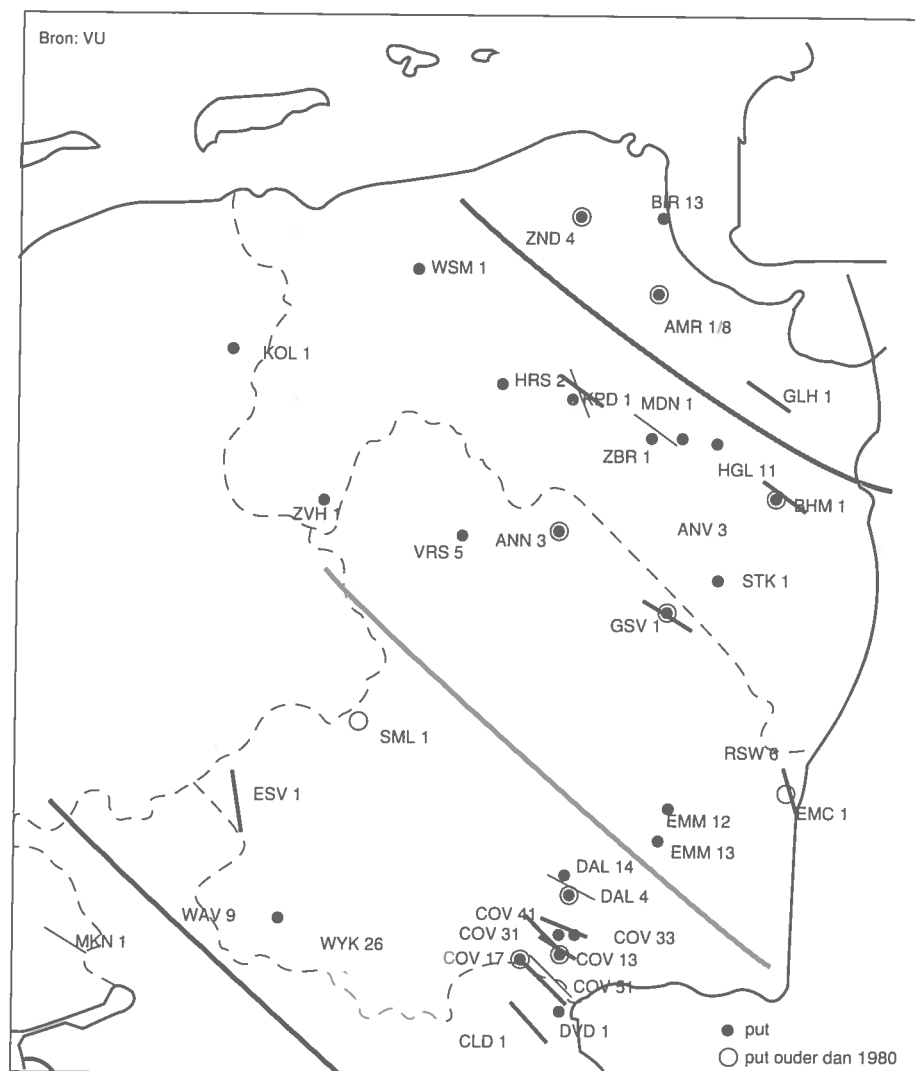
figuur 8: Richting van de maximale horizontale tektonische spanning voor Noordoost-Nederland boven (A) en in (B) de Limburg Groep (Carboon).



orientatie op grond van
breakouts in richting van de
grootste horizontale spanning (S_H)

orientatie op grond van
breakouts in richting van de
kleinste horizontale spanning (S_h)

B



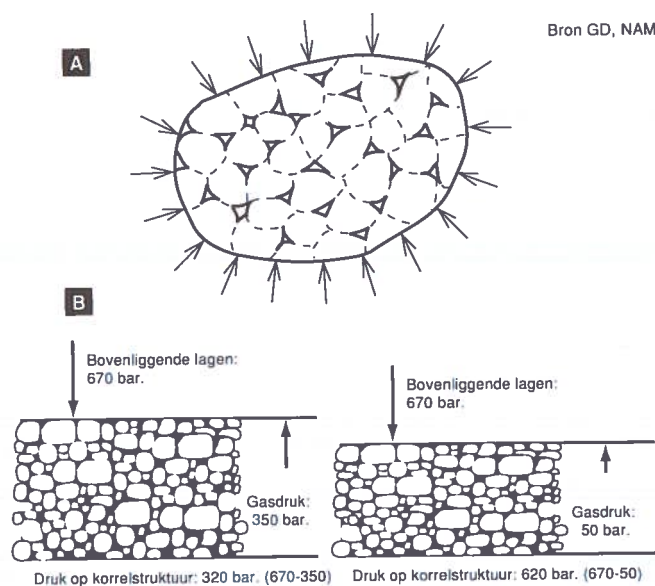
figuur 8: Richting van de maximale horizontale tektonische spanning voor Noordoost-Nederland boven (A) en in (B) de Limburg Groep (Carboon).

4 Geomechanische aspecten van gaswinning

4.1 Spanningsleer voor materialen met inwendige wrijving

De geomechanica beschrijft het gedrag van spanningen en verplaatsingen in de ondergrond. Deze ontstaan tengevolge van een interne of externe belasting en het eigen gewicht. Grond en gesteentelagen hebben daarbij een aantal eigenschappen die het onderscheiden van de meeste andere materialen. Een belangrijke speciale eigenschap is dat deze wel drukspanningen kan overbrengen, maar nauwelijks of geen trekspanningen. Voorts kunnen schuifspanningen meestal alleen worden overgebracht als ze klein zijn in relatie tot de normaalspanning. Tenslotte is het van belang dat een gedeelte van de spanningen in de ondergrond overgebracht wordt door de vloeistof in de poriën (water, olie of gas).

Figuur 9: Alzijdige belasting op poreus gesteente (A). Belasting op een gasreservoir (B).



Omdat de normaalspanningen in ondergrondse gesteentelagen bijna altijd drukspanningen zijn, worden drukspanningen positief genomen. Het eenvoudigste geval is dat van een alzijdige belasting door een uniforme normaalspanning σ , zie figuur 9. In het inwendige wordt deze spanning gedragen door een druk p in de poriën, en voorts door spanningen in het korrelskelet. De spanningen in het skelet worden deels veroorzaakt door krachten die in de contactvlakken worden overgebracht, en gedeeltelijk door de druk in de vloeistof of het gas, die de korrels omsluit. Het korrelskelet kan vervormen als gevolg van spanningen door schuiven, rollen in de contactvlakken en indrukking van de korrels. Stel, bijvoorbeeld, dat er geen geconcentreerde contactkrachten zijn en $p = \sigma$, dan heerst er in iedere korrel, die immers volledig is omhuld door de vloeistof, een spanning σ . De vervormingen die dan optreden worden veroorzaakt door de samendrukking van de porievloeistof en

de korrels. Dit alles leidt ertoe een aparte grootheid in te voeren; de effectieve spanning σ' :

$$\sigma' = \sigma - \gamma p$$

De factor γ hangt samen met de samendrukking van de individuele korrel en de grootte van het contactoppervlak. Voor gasvelden in Noord-Nederland is deze factor ongeveer 0,70. De vervormingen van het korrelskelet zijn gerelateerd aan de effectieve spanningen.

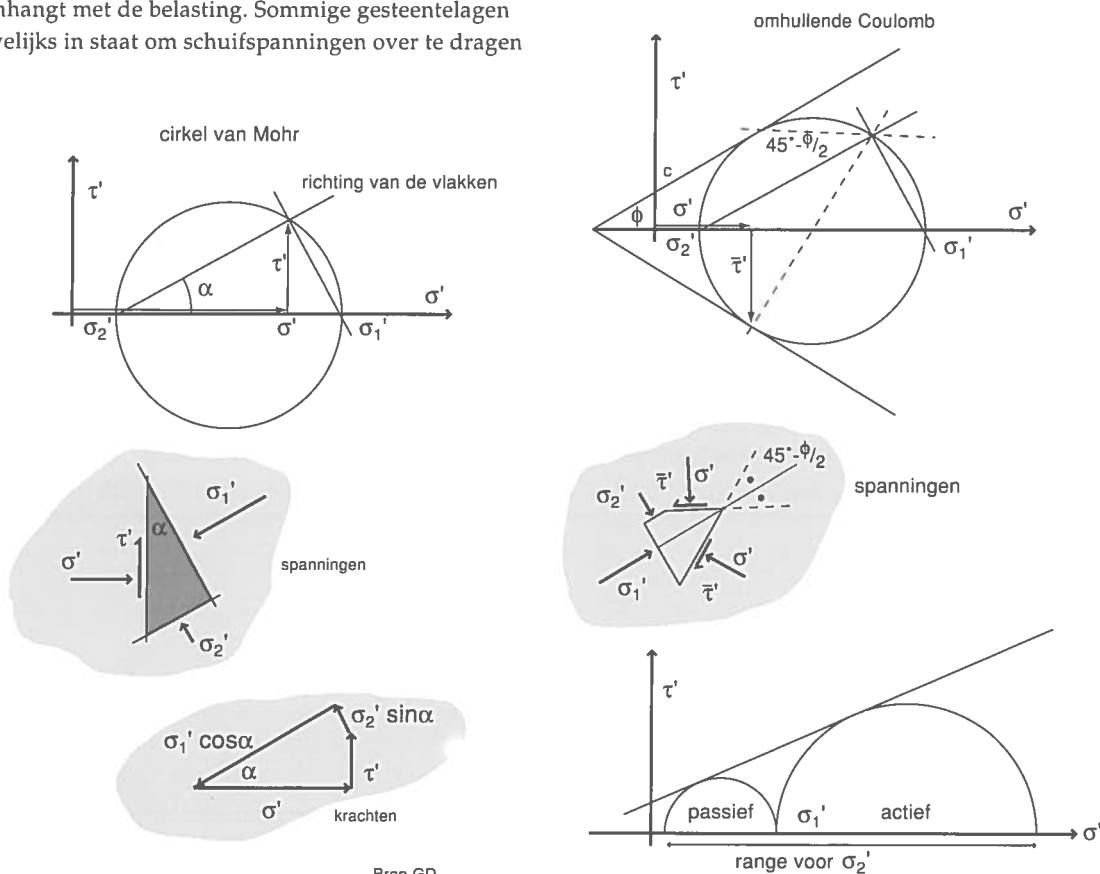
In het bovenstaande zijn normaalspanningen in de ondergrond beschreven. In het algemeen bestaat een willekeurige spanningstoestand uit normaalspanningen en schuifspanningen. Het gedrag van gesteente onder schuifbelasting wordt volledig bepaald door de schuifweerstand in het skelet, aangezien de porievloeistof niet in staat is een bijdrage in de schuifspanningsoverdracht te leveren. In vloeistofstroming kunnen weliswaar schuifspanningen voorkomen, maar deze zijn in het algemeen orden kleiner dan de vloeistofdruk. Een aparte spanningsgrootheid voor de schuifspanningen in het gesteentemassief is derhalve: $\tau' = \tau$.

Hierin is τ' de effectieve schuifspanning, die samenhangt met de schuifkrachten die in de contactvlakken tussen de korrels worden overgedragen, en τ is de opgelegde schuifspanning, die samenhangt met de belasting. Sommige gesteentelagen zijn nauwelijks in staat om schuifspanningen over te dragen

en gedragen zich als een taai vloeistof. In dat geval ontstaat er een min of meer alzijdige spanningstoestand: gelijke horizontale en verticale normaalspanningen. Dit gedrag vindt men bijvoorbeeld bij zoutformaties.

In principe kan een willekeurig vlak in de ondergrond een normaalspanning en een schuifspanning overbrengen. Het spanningsbeeld, weergegeven met normaalspanningen en schuifspanningen, noemt men spanningstensor, aangezien er een samenhang van de spanningen met de richting van het vlak bestaat. Door de oriëntatie van het vlak te draaien, veranderen de normaalspanning en de schuifspanning volgens de wetten van evenwicht. Er zijn standen van het vlak, waarbij de schuifspanning nul is. Dit zijn de zogeheten hoofdrichtingen. De normaalspanningen σ_1' en σ_2' in die hoofdrichtingen worden ook wel hoofdspanningen genoemd. De spanningstensor kan worden weergegeven met de cirkel van Mohr. Hierbij worden de normaalspanningen langs de horizontale as en de schuifspanningen langs de verticale as uitgezet. De spanningssituatie bij rotatie van het beschouwde vlak beschrijft dan een cirkel, zie figuur 10.

Figuur 10: De cirkel van Mohr en afschuiftoestanden.



Bron GD

Het blijkt dat gesteentelagen kunnen bezwijken als de schuifspanningen te groot worden, dat wil zeggen dat bezwijken optreedt als op een bepaald vlak de schuifspanningen een kritieke waarde bereiken. Langs andere vlakken treedt geen afschuiving op. De analogie met het schuiven van een stijf blok over een ondergrond met een zekere wrijvingscoëfficiënt bracht Coulomb ertoe om te stellen dat voor de kritieke schuifspanning $\bar{\tau}'$ geldt:

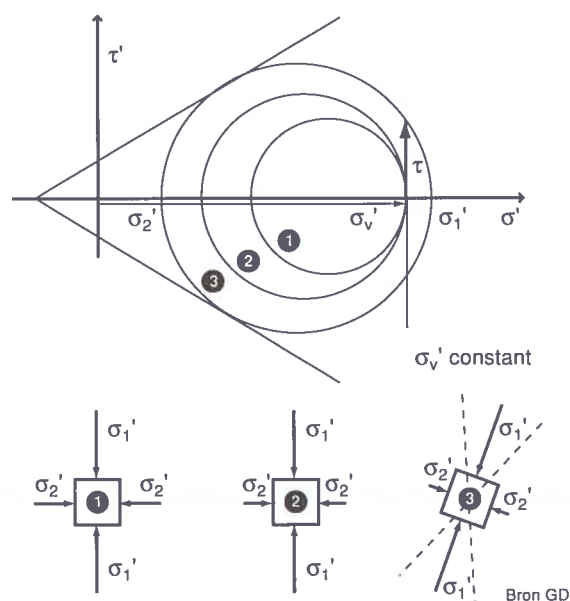
$$\bar{\tau}' = c + \sigma' \tan \phi$$

Hierin is σ' de effectieve normaalspanning op het beschouwde vlak, c de cohesie en ϕ de hoek van inwendige wrijving. De interpretatie van de kritieke schuifspanning is, dat de vervormingen beperkt zijn en zich bijvoorbeeld elastisch gedragen, als de schuifspanning onder de kritieke waarde blijft. Indien de schuifspanning op een bepaald vlak de kritieke waarde bereikt, ontstaat er een schuifvlak of breukvlak. In plaats van $\tan \phi$ wordt ook wel gesproken van de wrijvingscoëfficiënt μ . De waarden voor c en μ zijn experimenteel vast te stellen voor gesteentemonsters onder condities van temperatuur en druk zoals die gelden in de ondergrond.

De kritieke schuifspanning, of schuifsterkte, kan men eenvoudig grafisch weergeven bij de cirkel van Mohr, zie figuur 10. De bezwijkvoorwaarde bestaat uit twee rechte lijnen, de zogeheten omhullende van Mohr-Coulomb. Als de spanningcirkel geheel binnen de omhullende ligt, zal geen bezwijken optreden. Cirkels die gedeeltelijk buiten de omhullende vallen zijn onmogelijk, omdat dan op sommige vlakken de schuifspanning groter is dan toelaatbaar. Als de cirkel aan de omhullende raakt, zijn er twee vlakken (die een hoek van $45^\circ - \phi/2$ maken met de richting van de grootste hoofdspansing) waar de spanningstoestand kritiek is. Men kan verwachten dat bezwijken optreedt langs een van de twee vlakken of langs beide. Dit wordt aangeduid als plastisch gedrag.

Nu is in het bovenstaande gesproken over de lokale spanningstensor, die de spanningstoestand beschrijft in een punt. De grootte en oriëntatie van die spanningstensor volgt uit het evenwicht en de vervormingen van het hele massief onder invloed van belasting en eigen gewicht. Stijvere lagen zullen grotere spanningen tonen, omdat deze zich meer verzetten tegen teweeggebrachte vervormingen. Sommige lagen zullen geen schuifspanningen kunnen overbrengen (zoutformaties) en veroorzaken daarom in de aangrenzende lagen afwijkende spanningssituaties. Zoals in het bovenstaande is uiteengezet, bepaalt de schuifspanning het verschil tussen de hoofdspansingen. Als de schuifspanning wordt beperkt, of wordt verminderd door de aanwezigheid van een afschuifzone of breuk, zullen de hoofdspansingen overeenkomstig wijzigen. Ook kan daarbij de oriëntatie ervan veranderen (rotatie van de hoofdspansingen).

In de ondergrond is meestal de verticale spanning bij benadering bekend, aangezien deze samenhangt met het eigen gewicht. Het is aannemelijk dat de verticale spanning ook een hoofdspansing is. Over de horizontale spanning is veelal minder bekend. Deze kan een waarde aannemen tussen de actieve en passieve bezwijktoestand, zie figuur 10. Uitgaande van een geologische historie, waarbij geen horizontale verplaatsingen zijn opgetreden, is met behulp van de elasticiteitsleer de waarde van de horizontale spanning vast te stellen. Dit is aangegeven in figuur 11 (cirkel 1).



Figuur 11: Spanningsveranderingen bij constante verticale spanning.

Vervolgens kunnen er, door bijvoorbeeld gaswinning, spanningsveranderingen plaatsvinden. In de beschouwde situatie verandert vooral de horizontale spanning, die afneemt door geïnduceerde rek, veroorzaakt door deformaties in het reservoir. De actuele maximale schuifspanning (deviatorspanning) neemt toe (cirkel 2). Bovendien ontstaan er ook extra schuifspanningen, die samenhangen met randeffecten bij het reservoir. Hierdoor roteren de hoofdspansingen en neemt de deviatorspanning nog meer toe (cirkel 3). In de laatste spanningssituatie is verondersteld dat de schuifsterkte volledig wordt aangesproken en er een bezwijktoestand optreedt.

4.2 Geologie en geomechanica

Vervormingen treden op ten gevolge van opgelegde belastingen en eigen gewicht. De aanwezige spanningen en vervormingen hangen met elkaar samen. Uit de elasticiteitsleer is bekend dat de relatie tussen enerzijds normaalspanningen en samendrukking en anderzijds schuifspanningen en

hoekverdraaiing kunnen worden weergegeven met twee materiaalparameters, namelijk de compressiemodulus K en de glijdingsmodulus G . In plaats daarvan hanteert men ook wel de elasticiteitsmodulus E en de dwarscontractiecoëfficiënt ν . Als $\nu = 0,5$ is er sprake van volumebestendigheid, dat wil zeggen dat tijdens vervorming het volume gelijk blijft. Bij rubber is dat zo, maar ook bij zoutformaties. De meeste gesteentelagen bezitten een waarde voor de dwarscontractiecoëfficiënt rond de 0,3.

Het vervormingsgedrag van gesteentelagen wordt door twee materiaalconstanten beschreven, mits de spanningen niet kritiek worden, ofwel mits de spanningscirkel binnen de omhullende van Mohr-Coulomb blijft. Als de spanningscirkel raakt aan de omhullende treedt plastisch gedrag op, dat wordt beschreven met de cohesie en de hoek van interne wrijving. De hierbij optredende verplaatsingen worden bepaald door het vervormingsveld. Er vindt dan herverdeling van spanningen plaats. Dit proces kan met numerieke berekeningsmodellen worden gevolgd. Er zijn andere beschrijvingen van het plastisch gedrag, maar in deze studie wordt die volgens Mohr-Coulomb gehanteerd.

In de ondergrond zijn spanningen aanwezig die samenhangen met de geologische geschiedenis. Deze spanningen zijn bij benadering bekend. In werkelijkheid is de ondergrond opgebouwd uit verschillende lagen die een onregelmatig patroon vormen. Voor niet-lineair gedrag, bijvoorbeeld lokaal bezwijken langs breuken, is de aanwezige spanning van belang. In paragraaf 3.5 is ingegaan op de kennis die er is over de aanwezige spanningen. Helaas is die onvoldoende en zijn we genooddaakt om veronderstellingen te maken over de aanwezige spanningstoestand voor de gaswinning. Gekozen is voor de aanpak om met de beschikbare rekenmodellen een consistent initieel spannings- en vervormingsveld te berekenen door het eigen gewicht als het ware “aan te zetten”. Een nog eenvoudiger methode is om uit te gaan van een geschematiseerde horizontale gelaagdheid, zodat de hoofdspanningsrichtingen precies verticaal en horizontaal zijn. De verticale spanning wordt dan bepaald door het gewicht van de bovenliggende lagen. De verhouding tussen de horizontale en verticale spanning is constant en gelijk aan $\nu/(1-\nu)$. Deze verhoudingsconstante wordt ook wel aangeduid met K_0 . De waarde van K_0 voor gesteentelagen in Noord-Nederland ligt waarschijnlijk tussen 0,4 en 0,5. Als de gaswinning start, ontstaan er spanningsveranderingen en vervormingen. De waarde van K_0 verandert dan.

Een bijzondere situatie kan zich voordoen in een breuk langs gesteentelagen met grote verschillen in sterkte en stijfheid. Toenemende schuifspanningen leiden al snel tot lokaal plastisch gedrag in de slappere lagen. Er ontstaat een concentratie van spanningen in de stijvere zone. Als de breukzone het begeeft, kunnen dynamische (schoksgewijze) verschuivingen optreden. Temeer, daar de schuifsterkte

statisch gewoonlijk hoger is dan dynamisch. In het reservoir Eleveld is zo'n situatie aanwezig. Direct boven het reservoir onder de zoutformatie bevinden zich stijve klei- en kalksteenlagen, zie figuur 22.

In dit rapport wordt het geomechanisch gedrag van het reservoir Eleveld en de omgeving ervan beschreven. Zoals in het bovenstaande is uiteengezet hangen het spannings- en het vervormingsveld nauw samen. In de presentatie wordt soms een beschrijving van het verplaatsingsveld gegeven, bijvoorbeeld in het geval van de reservoircompactie en de bodemdaling, en soms een beschrijving van het spanningsveld, bijvoorbeeld in het geval van het breukgedrag.

Bij de berekening van de geomechanische effecten ten gevolge van gaswinning en eigen gewicht is gebruik gemaakt van geavanceerde numerieke computermodellen. Hoewel het effect van gaswinning op de omgeving in principe een driedimensionaal probleem is, zijn er vanwege de complexiteit tweedimensionale analyses gemaakt. De resultaten van deze analyses zijn voldoende om de samenhang van gaswinning en aardbevingen vast te stellen en te beoordelen.

4.3 Gaswinning en geomechanica

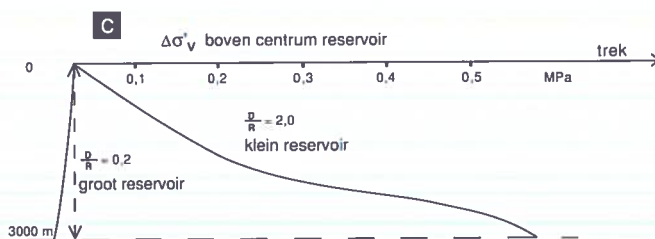
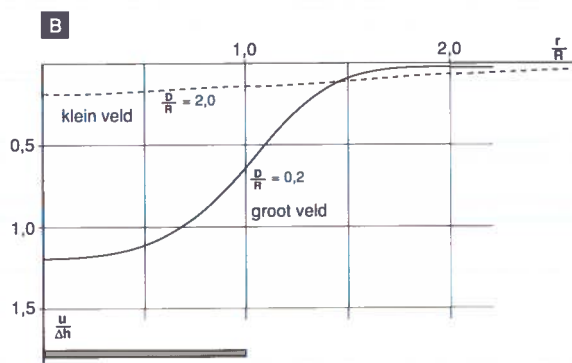
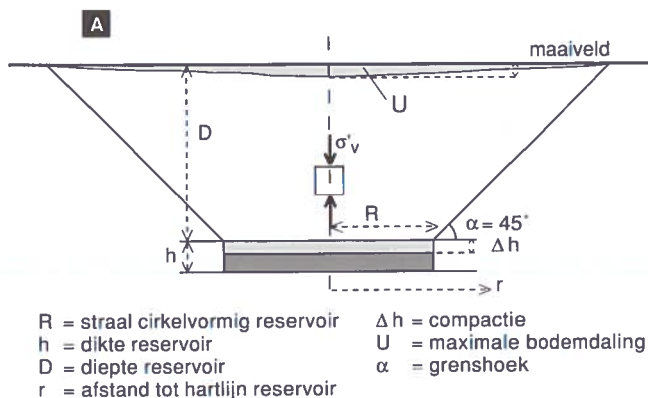
Bij gaswinning wordt het gas onttrokken aan de poriën van een gesteentelaag in de ondergrond (het reservoir). Dit gas is in de loop van de geologische tijd opgeslagen in deze poriën. In Noordoost-Nederland is het overgrote deel van de gasvelden gelegen onder een dik en ondoorlatend zoutpakket, zodat het gas daar is geaccumuleerd. Bij het aanboren van een gasreservoir stroomt het gas spontaan door de boorbuis naar het oppervlak. Hierdoor daalt de gasdruk in het reservoir geleidelijk. Aangezien het gewicht van de boven het reservoir gelegen aard- en gesteentelagen niet verandert, zal de effectieve spanning in het reservoir toenemen om de verlaging van de gasdruk te compenseren. De toename van de effectieve spanning gaat gepaard met een samendrukking van het reservoir; de compactie (Δh).

De mate van compactie hangt af van een aantal factoren, zoals de verlaging van de gasdruk (Δp), de samendrukbaarheid van het reservoirgesteente (c_m) en de dikte van het reservoir (h). In formulevorm:

$$\Delta h = c_m \cdot h \cdot \Delta p$$

De coëfficiënt c_m is onder andere afhankelijk van de porositeit, de aard van het gesteente, de verkitting van de korrels en de diepte waarop het reservoir zich bevindt. Een gasreservoir in de Slochteren Zandsteen, dat zich op een diepte van 3000 m bevindt en een dikte heeft van 200 m, kan bij een gasdrukverlaging van 300 bar bijvoorbeeld 40 cm samengedrukt worden.

De compactie van het reservoir is mogelijk als de omringende lagen dat toelaten. Het hangt samen met de mobiliteit van de omgeving. Door de omgeving kan een deel van het bovgewicht worden gedragen (boogwerking of liggerwerking). Men spreekt dan van spanningsherverdeling. De toename van de effectieve verticale spanning in het reservoir, die samenhangt met de verlaging van de gasdruk, is overeenkomstig minder. De compactie is dan beperkt. Boogwerking en spanningsherverdeling spelen een rol als de diepteligging (D) van het reservoir groter is dan de uitgestrektheid (R) van het reservoir. In figuur 12 is volgens een eenvoudig model voor een uniform elastisch massief de verticale spanningsafname midden boven het reservoir aangegeven voor verschillende verhoudingen van diepte en afmeting van het reservoir. Als het reservoir onder een plastische laag ligt (zoutformatie), dan treedt dit effect slechts tijdelijk op.



Bron SodM

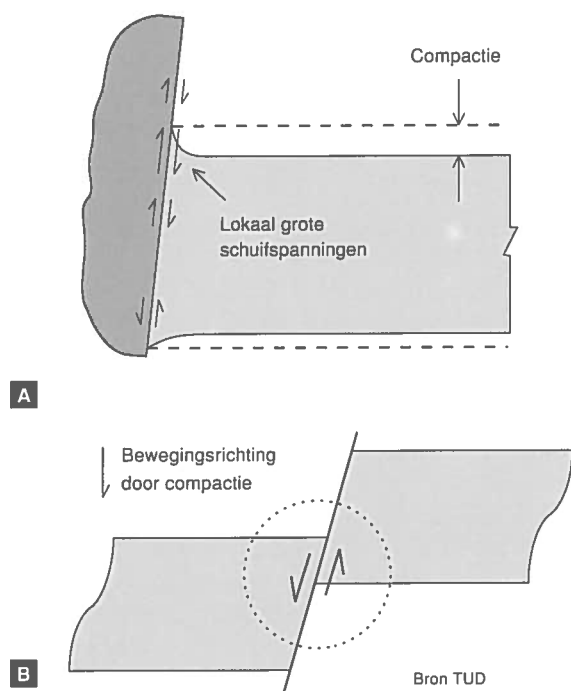
De compactie van het reservoir wordt aan de oppervlakte merkbaar als bodemdaling. In het algemeen is de bodemdaling minder dan de compactie zelf vanwege de diepteligging (D) van het reservoir en de uitgestrektheid (R). Ondiepe reservoirs veroorzaken meer bodemdaling dan dieper gelegen reservoirs. Een groot reservoir veroorzaakt een bodemdaling die boven het middengedeelte gelijk of groter is aan de reservoircompactie, afhankelijk van eventueel geïnduceerde compactie van het onder- en bovenmassief. Aan de randen is er een geleidelijke overgang. In figuur 12 is, uitgaande van een uniform elastisch massief, de vorm van de dalingsschotel weergegeven voor een groot gasveld ($D/R = 0,2$, Groningen) en een klein gasveld ($D/R = 2,0$, Elefeld). De bodemdaling is uitgezet in relatie tot de compactie van het reservoir ($u/\Delta h$). De grafiek laat zien dat de bodem boven een klein reservoir minder zakt, maar deze zakking is merkbaar over een relatief groter gebied.

De dikte van het reservoir kan variëren en het reservoir is soms doorsneden door breuken. Dit leidt tot differentiële compactie; verschilzettingen. In de directe omgeving veroorzaakt dat schuifspanningen, spanningsrotatie en daarbij behorende vervormingen, zie figuur 13. Langs bestaande breuken waar immers de schuifsterkte relatief gering kan zijn, kan daardoor een verschuiving worden veroorzaakt.

Naast de effecten van de verticale spanningen en vervormingen, zijn er effecten in de horizontale richting. Hierbij wordt door de gasdrukverlaging in het reservoir ook een toename van de horizontale effectieve spanningen veroorzaakt. Vanwege de inklemming van het reservoir tussen onder- en bovenmassief is de horizontale krimp en dus ook de horizontale spanningstoename echter beperkt. Er treden voornamelijk schuifspanningen op met maximale waarden aan randen en in breukvlakken. Als het reservoir aansluit aan plastische lagen, een zoutformatie, treedt dit effect tijdelijk op. Verticale of steilstaande breuken zijn met name gevoelig. Omdat de schuifspanningen veel sterker kunnen toenemen dan de effectieve normaalspanningen, neemt door de gaswinning de kans op verschuiven in breukvlakken niet af, maar eerder toe. Met modelberekeningen is aangetoond, dat bij een bepaalde scheefstand en spronghoogte van een breuk in het reservoir de grootste schuifspanningen en verschuivingen kunnen optreden, omdat de tegengesteld gerichte bewegingen op dezelfde hoogte liggen, zie figuur 13.

Figuur 12: A: Schematisch overzicht bodemdaling. B: Relatie bodemdaling en compactie voor een groot en een klein reservoir. C: De spanningsverandering in verticale richting met de diepte boven het centrum van een groot en een klein gasreservoir.

Berekeningen tonen aan dat door gaswinning veroorzaakte spanningsveranderingen langs bestaande breuken kunnen leiden tot verschuivingen over een beperkte lengte. Verschuivingen kunnen geleidelijk plaatsvinden of plotseling. In het laatste geval leidt dat tot dynamische verschijnselen, die als aardbevingen waarneembaar zijn. Als in zo'n bestaande breuk al vóór de gaswinning een bijna kritieke spanningssituatie heerste, kan de gaswinning de druppel zijn die de emmer doet overlopen.



Figuur 13: Randeffect en breukgedrag in het reservoir.

Bij breuken gevuld met plastisch materiaal (bijvoorbeeld zout) zal naar verwachting het grootste deel van de verschuiving plastisch plaats vinden, dus niet dynamisch (aseïsmisch). Er kunnen echter plaatselijke oneffenheden zijn, de zogenoemde asperities, die een barrière vormen voor de beweging in het breukvlak. Aardbevingen kunnen ontstaan als zo'n barrière het plotseling begeeft als gevolg van oplopende schuifspanningen bij voortgaande gaswinning. De schuifsterkte van een breukvlak kan in principe worden aangegeven met een cohesie c en een hoek van interne wrijving ϕ , zoals dat in de vorige paragraaf uiteen is gezet. De waarde van c en ϕ hangen echter samen met de geometrie van de breuk, met de bewegingsrichting en de aard van de verschuiving (dynamisch of statisch). Het door middel van veldproeven vaststellen van de juiste waarden van c en ϕ is praktisch onmogelijk.

4.4 Breukvorming, slip en zoutgedrag

In de loop van de geologische geschiedenis is de aardkorst vervormd als gevolg van de verplaatsingen van de continentale platen. Deze bewegingen hebben breuken en plooien in de ondergrond veroorzaakt. Sommige gesteentelagen kunnen over honderden meters ten opzichte van andere lagen worden verplaatst. Dergelijke relatieve verplaatsingen verlopen over het algemeen zeer geleidelijk met snelheden van minder dan één millimeter per jaar. We spreken dan van aseïsmische slip. In bepaalde situaties kunnen deze bewegingen echter schoksgewijs verlopen, waarbij aardbevingen ontstaan. We spreken dan van seïsmische slip.

De vervorming die kan optreden bestaat uit twee componenten. De een is de elastische vervorming, en de ander is de verschuiving: de blijvende verplaatsing langs een breuk. Beide componenten kunnen worden vastgesteld door het spannings- en vervormingsveld van het hele systeem te berekenen. Dit is in deze studie uitgevoerd met numerieke modellen. Voor de dynamische interpretatie is de maximaal mogelijke verschuiving essentieel.

In gesteentemassieven waarin reeds breuken voorkomen, zoals dat het geval is bij gasvelden in Nederland, is over het algemeen de schuifsterkte in de breukvlakken geringer dan elders in het gesteente. De oorzaak ligt in de beperkte cohesie langs het breukvlak en de vermindering van de wrijvingscoëfficiënt als gevolg van fijnkorrelig of plastisch materiaal, zoals wrijvingsmeel, klei en zout, dat langs het breukvlak kan voorkomen. Bovendien varieert de schuifsterkte en de schuifweerstand afhankelijk van oneffenheden (asperities) langs het breukvlak. Ook kan de beweging in een breukvlak afwisselend blijven steken en vervolgens weer voortgaan (stick-slip gedrag). Het is aannemelijk dat bij spanningsopbouw er eerder verschuivingen zullen optreden in bestaande breuken, dan dat er nieuwe breuken met dezelfde oriëntatie zullen ontstaan.

In het bovenstaande is ingegaan op de mechanische eigenschappen van breuken in statische zin. De mate van verschuiving hangt samen met wat de omringende lagen toelaten. Immers, bij verschuiving treedt een spanningsherverdeling op en zal zich een nieuw evenwicht instellen. De sterkte van een breukvlak is statisch meestal groter dan dynamisch. Dat betekent dat, als een breuk gaat schuiven, de verschuiving zelf wordt versterkt door de daarbij optredende sterktereductie. In de mijnbouw wordt dit aangeduid met "excess shear stress". Voor het initiëren van de verschuiving is deze maat niet essentieel, wel voor de energie die kan vrijkomen in de vorm van seïsmische trillingen.

Het schuifgedrag zelf is een ingewikkeld proces. Bij de bepaling van de dynamische effecten van verschuivingen in breuken wordt derhalve een empirische aanpak gekozen. Bij de bepaling van het effect van seismische slip wordt uitgegaan van het seismisch moment (M_0):

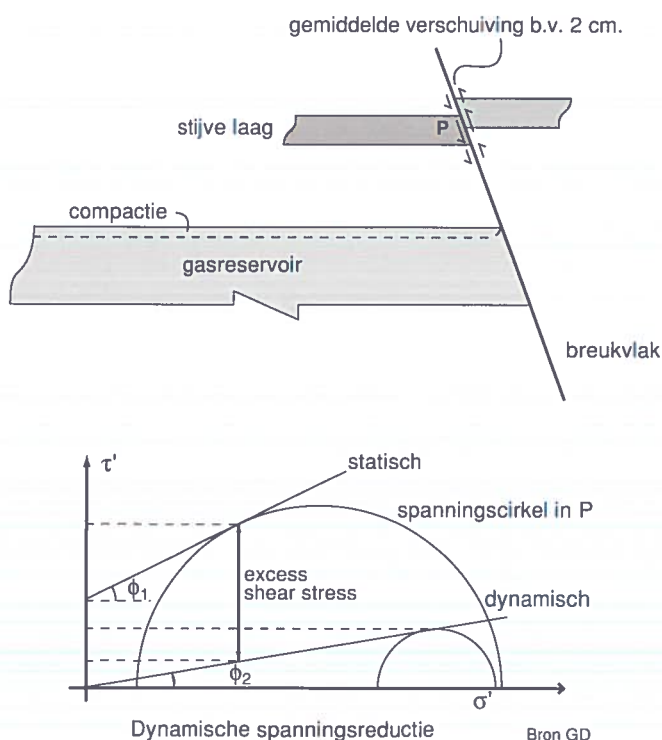
$$M_0 = G \cdot A \cdot \bar{u} \text{ (MNm)}$$

Hierin is G de lokale glijdingsmodulus en A is het oppervlak van de breuk waarover een plotselinge gemiddelde verschuiving $\bar{u}$ optreedt. Uit het seismisch moment is dan met de empirische formule volgens Hanks-Kanamori de te verwachten magnitude M_L op de schaal van Richter af te leiden:

$$M_L = (\log(M_0) - 3,1) / 1,5$$

Stel dat zich aan de rand van een reservoir een bestaand breukvlak bevindt dat door de spanningsopbouw ten gevolge van gaswinning in het reservoir in een kritieke toestand komt, zie figuur 14. Op basis van berekeningen wordt bijvoorbeeld vastgesteld dat zich over een gebied van 6000 m² een verschuiving van $\bar{u} = 2$ cm kan voordoen. De glijdingsmodulus is vastgesteld op 6000 MPa. Dit resulteert in een seismisch moment $M_0 = 7,2 \cdot 10^5$ MNm en een bijbehorende magnitude van $M_L = 1,9$.

Figuur 14: Mogelijke seismische slip langs een randbreuk.



De meeste gasvelden in Nederland zijn gelegen onder een dikke laag zout, de Zechsteinformatie. Deze formatie bezit een relatief grote mobiliteit (plastisch gedrag). Door dichtheidsverschillen en grootschalige spanningsherverdelingen zijn in de loop van de geologische geschiedenis zoutkussens en zoutpijlers (diapieren) ontstaan. Binnen de zoutformatie heerst een vrijwel isotrope spanningstoestand die wordt gekenmerkt door zeer kleine schuifspanningen. De horizontale en verticale effectieve spanningen zijn dan nagenoeg gelijk ($K_0 = 1,0$). In aangrenzende gesteentelagen, waarin wel schuifspanningen kunnen bestaan, zal de spanningstoestand zich zodanig instellen dat er aan de rand met de zoutformatie geen schuifspanningen optreden. Dit heeft uiteraard consequenties voor de spanningen en vervormingen in het hele massief, met name aan de rand van een compacterend reservoir. Het zout vormt een relatief zwak element in de structuur. In zoutformaties kunnen wel kortstondig schuifspanningen worden overgebracht. Het zout gaat vloeien en de schuifspanningen gaan relaxeren. De snelheid van dit proces hangt samen met de viscositeit van het zoutgesteente. In hoofdstuk 7 komt dit aspect aan de orde. Ook zonder gaswinning kan boven zoutpijlers mettertijd een zodanige spanningsherverdeling plaatsvinden dat breukvorming of schoksgewijze verplaatsing langs bestaande breukvlakken kan plaats vinden. Daartegenover kan een zoutformatie ook zorgen voor reductie van spanningscontrasten en differentiële zettingen, en kan het plastische gedrag de kans op abrupte veranderingen verkleinen. In de tijd gezien verlopen deze processen met zeer geringe snelheid.

5 Seismologie Noord-Nederland

5.1 Seismiciteit Noord-Nederland

In Noord-Nederland zijn van december 1986 tot en met augustus 1993, 24 bevingen geregistreerd. Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste parameters van de bevingen zoals tijdstip, locatie, diepte en magnitude.

Deze parameters zijn vooral bepaald met het netwerk van seismometers rond Assen en de boorgatseismometers te Finsterwolde (FIN).

Naar aanleiding van een aantal bevingen zijn enquêtes onder de bevolking verricht. Deze enquêtes hadden ten doel macroseismische gegevens te verschaffen zoals de intensiteit in het epicentrale gebied. Daarnaast zijn de enquêtes nuttig geweest om in een aantal gevallen ook diepte en epicentrum te kunnen schatten daar waar geen of onvoldoende instrumentele gegevens voorhanden waren (zie rapporten KNMI naar aanleiding van de bevingen bij Assen, Hooghalen, Purmerend, Emmen, Geelbroek, Eleveld en Middelstum). In figuur 15 is een voorbeeld gegeven van een macroseismische intensiteitskaart. Figuur 16 geeft een overzicht van de epicentra van de geregistreerde bevingen en de ligging van de seismische stations rond Assen en het station Finsterwolde.

In een aantal opzichten vormen de eerste drie aardbevingen, die van Assen, Hooghalen en Purmerend, een uitzondering ten opzichte van de andere bevingen. In de eerste plaats behoren zij in magnitude en intensiteit tot de sterkste aardbevingen van de serie en bovendien zijn dit alle drie bevingen die buiten de rand van de gasvelden gelegen zijn. Het zijn overigens juist deze bevingen die de aanleiding vormden voor deze studie. De aardbeving van Purmerend neemt een solitaire plaats in omdat zich nadien geen andere schokken hebben voorgedaan in hetzelfde gebied. In 1991 is de produktie van gas uit het gasveld Middelie beëindigd.

De maximale sterkte van aardbevingen in Zuid-Nederland is aanzienlijk groter dan in Noord-Nederland. De Roermond aardbeving van 13 april 1992 met een kracht van 5,7 op de schaal van Richter is daarvan het meest recente voorbeeld. De amplitudes van de bodembewegingen van deze aardbeving waren ca. 1000 keer groter dan de sterkste aardbeving in Noord-Nederland. De uitgestraalde energie in de vorm van seismische golven was zelfs meer dan 10.000 keer groter.

In de catalogus van aardbevingen in Nederland (Houtgast, 1991) worden twee gebeurtenissen beschreven van vóór 1986 in Noord-Nederland. Waarschijnlijk betreffen dit geen aardbevingen, maar zijn de opgetreden verschijnselen verbonden met grote stormen. Er zijn dus geen aardbevingen beschreven in Noord-Nederland vóór de periode van gaswinning. De detectie van aardbevingen is in de loop der jaren sterk verbeterd door meer en betere instrumenten, maar ook door de toename van de bevolkingsdichtheid. Toch zijn

Tabel 1.

Plaats	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten N.B. O.L.	"Amersfoort" coördinaten km	Intensiteit ¹ I ₀	Magnitude ² M _L	Diepte km	Opmerkingen ⁵
Assen	26/12/1986	07:47	52.99; 06.55	556.4; 233.0 ± 1	IV-V	2.8	1 ± 0.5	Enquête: WIT, WTS, ENN * ⁶
Hooghalen	14/12/1987	20:49	52.93; 06.55	549.7; 233.2 ± 1	IV	2.5	1.5 ± 0.5	Enquête: WIT, WTS, ENN *
Purmerend	01/12/1989	20:09	52.53; 04.97	504.7; 126.7 ± 1	V	2.7	1.2 ± 0.4	Enquête: WIT, WTS, ENN *
Emmen	15/02/1991	02:11	52.77; 06.91	532.5; 258.0 ± 1	III-IV	2.2	3 ± 2	Enquête: WIT, WTS, netwerk Assen 3 *
Geelbroek I	25/04/1991	10:26	52.95; 06.57	552.2; 234.8 ± 0.2	III-IV	2.6	3.0 ± 0.3	Enquête: WIT, WTS, netwerk Assen *
Eleveld I	08/08/1991	04:01	52.96; 06.57	553.2; 234.2 ± 0.2	III-IV	2.7	3.5 ± 0.3	WIT, WTS, netwerk Assen *
Middelstum I	05/12/1991	00:24	53.36; 06.66	597.5; 239.6 ± 1	III	2.4	< 2	Enquête: WIT, WTS, netwerk Assen *
Geelbroek II	23/05/1992	15:29	52.95; 06.57	552.4; 234.8 ± 0.2	III-IV	2.6	3.1 ± 0.3	WIT, WTS, netwerk Assen *
Geelbroek III	24/05/1992	18:00	52.95; 06.57	552.0; 234.5 ± 0.3	II	1.6	-	netwerk Assen *
Roswinkel	11/06/1992	17:09	52.85; 07.04	541.5; 266.3 ± 1	III-IV	2.5	1.5 ± 1	Enquête: WIT, WTS, ENN, netwerk Assen *
Eleveld II	22/07/1992	23:23	52.96; 06.58	552.8; 234.5 ± 0.2	III	2.4	3.5 ± 0.3	WIT, WTS, ENN, netwerk Assen, FIN 4 *
Ten Boer	06/12/1992	20:34	53.32; 06.77	593.1; 247.2 ± 2	I	2.0	-	FIN
Slochteren	11/12/1992	13:00	53.22; 06.79	581.8; 248.7 ± 2	I	2.0	-	FIN
Noordbroek	12/02/1993	11:46	53.22; 06.87	582.1; 253.7 ± 2	I	1.4	-	FIN
Langelo	05/03/1993	22:27	53.09; 06.44	568.2; 225.2 ± 1	II-III	1.8	-	Enquête: netwerk Assen, FIN *
Hoogezand	12/03/1993	22:12	53.16; 06.79	575.8; 248.6 ± 2	I	1.6	-	FIN
Overschild	26/03/1993	18:34	53.29; 06.80	590.0; 249.1 ± 2	I	1.8	-	FIN
Haren	05/05/1993	20:08	53.14; 06.66	572.8; 240.1 ± 2	I	1.8	-	FIN
Ten Post	14/05/1993	19:39	53.30; 06.76	591.5; 246.5 ± 2	I	1.7	-	FIN
Bedum	27/06/1993	02:09	53.32; 06.66	593.4; 239.7 ± 2	I	1.8	-	FIN
Stedum	27/06/1993	02:57	53.31; 06.70	592.4; 242.5 ± 2	I	1.5	-	FIN
Appingedam	10/07/1993	00:22	53.33; 06.86	594.5; 253.1 ± 2	I	2.2	-	FIN
Loppersum	27/07/1993	13:39	53.35; 06.79	596.9; 248.1 ± 2	I	1.5	-	FIN
Nijenklooster	23/08/1993	00:51	53.35; 06.83	596.3; 251.3 ± 2	I	1.5	-	FIN

1 Nauwkeurigheid intensiteit ± 0.5 eenheid

2 Nauwkeurigheid magnitude ± 0.2 eenheid

3 Het netwerk Assen is sinds 1989 operationeel

4 FIN is in juli 1992 permanent gaan registreren

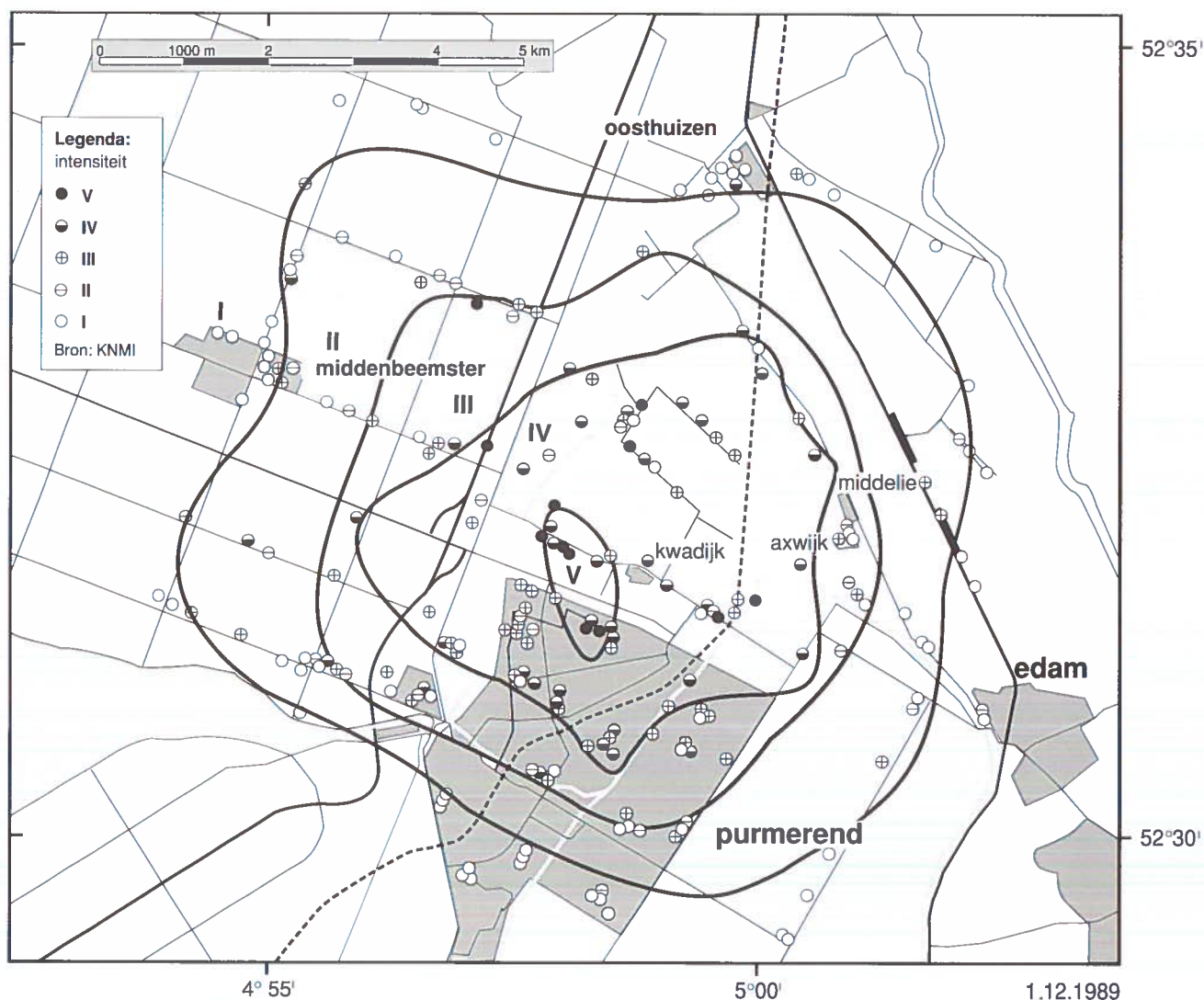
5 In deze kolom zijn de seismische stations aangegeven waar de betreffende

beving geregistreerd is

6 Het KNMI heeft over de met * gemerkte bevingen meldingen uit het publiek ontvangen

zeker niet alle opgetreden aardbevingen waargenomen. Ook de data set van 24 bevingen in Tabel 1 is niet compleet met name voor kleine magnitudes. Hiermee is rekening gehouden bij de verdere analyse. Overigens is de periode waarin de aardbevingen hebben plaatsgevonden kort en is het aantal bevingen klein om zeer nauwkeurige statistische analyses, zoals de berekening van de maximale te verwachten magnitude, uit te voeren.

figuur 15: Isoleistenkaart van de aardbeving van Purmerend op 1 december 1989. De cirkeltjes geven de geëncquêteerde punten weer.



figuur 16: Epicentra van de geregistreerde bevingen in Noord-Nederland (stippen). De nummers van de aardbevingen zijn terug te vinden in tabel 1 op pagina 35. De driehoekjes geven de seismische stations weer, de grijze gebieden zijn gasvelden.

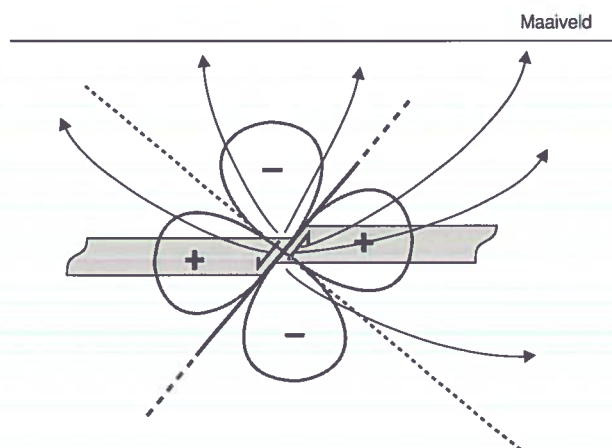
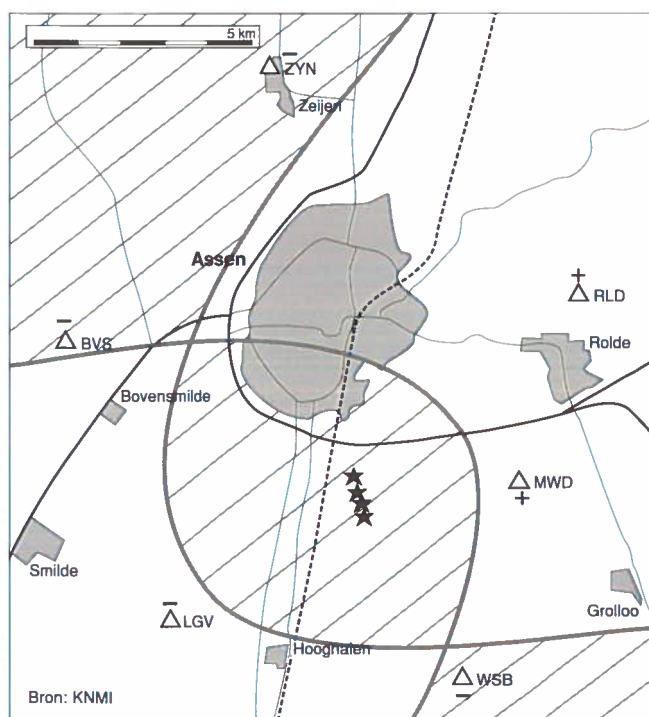


5.2 Haardvlak oplossing Eleveld

Voor de vier sterkste aardbevingen in het Eleveld gasveld is de meest complete analyse van de seismogrammen gemaakt. Zo is uit de richting van de eerste uitslagen op de seismogrammen in eerste benadering de haardvlakoplossing bepaald. Deze oplossing geeft aan in welke richting het gesteente langs de breuk verschoven is. Hiermee kunnen dus naast de ligging van de hypocentra nog extra aanwijzingen gevonden worden, die de breuk waarlangs de verschuiving heeft plaatsgevonden, identificeren. De haardvlak oplossing wordt verkregen door het stralingspatroon van de tijdens de beving opgewekte P-golven te reconstrueren (zie figuur 17).

figuur 17: Haardvlak oplossing Eleveld.

In de plattegrond is het gebied waar de P-golven een negatief teken hebben gearceerd. Onder is een dwarsdoorsnede gegeven.



5.3 Bepaling maximale magnitude voor Noord-Nederland

De verdeling van het aantal aardbevingen naar sterkte wordt gegeven door de Gutenberg-Richter relatie. Dit is een model voor de cumulatieve frequentie en de magnitude:

$$\log N = a - b.M_L$$

waarbij M_L de lokale magnitude is en N het cumulatieve jaarlijkse aantal bevingen. Dus N geeft aan hoeveel bevingen er jaarlijks zijn opgetreden met een magnitude groter of gelijk aan een gekozen M_L . De coëfficiënten a en b worden berekend met de kleinste kwadraten methode.

De cumulatieve frequentie-magnitude kromme buigt bij een zekere magnitude naar een asymptotische waarde; dit is de maximaal mogelijke magnitude, zie figuur 18. Deze maximaal mogelijke magnitude is dus een theoretisch begrip. De waarschijnlijkheid dat deze beving optreedt is zeer klein. De cumulatieve frequentie-magnitude relatie wordt bepaald uit de waargenomen aardbevingen zonder voor- en naschokken. De waarde voor N wordt berekend voor verschillende magnitude-klassen, alleen voor de perioden waarvoor de data compleet zijn. Zo is bijvoorbeeld door het station FIN de detectiegrens van aardbevingen in Groningen en Noord-Drenthe verlaagd tot $M_L = 1,5$.

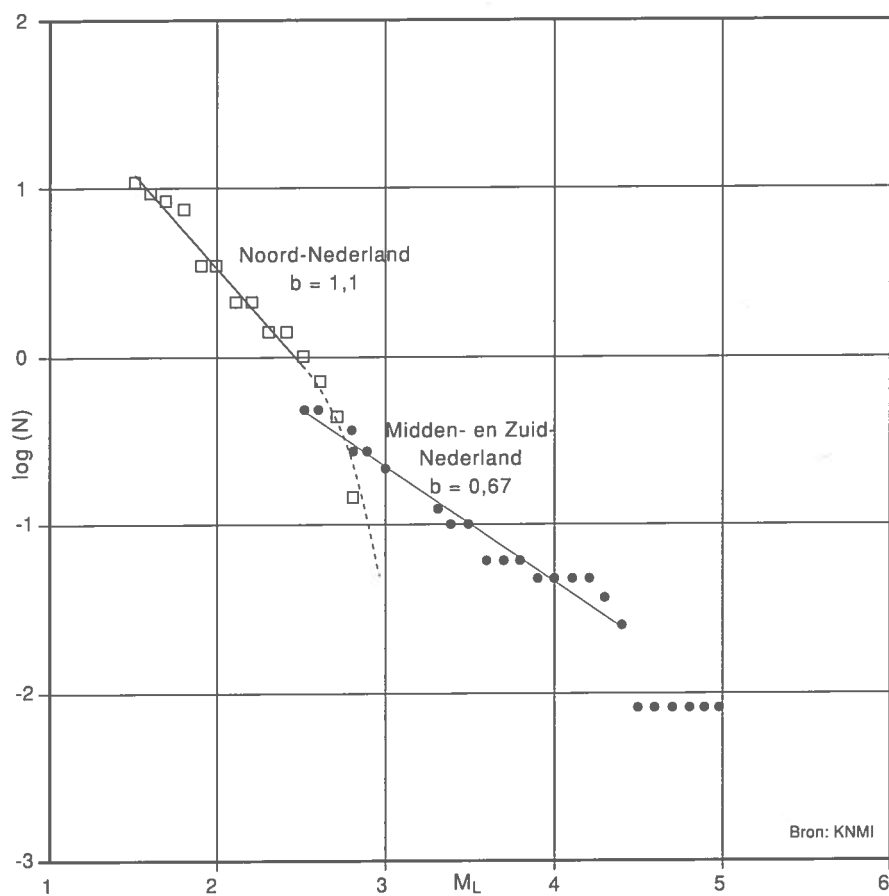
Het lineaire deel van de cumulatieve frequentie-magnitude relatie van aardbevingen in Noord-Nederland van 1986-1993 is weergegeven in figuur 18 en wordt beschreven door de uitdrukking:

$$\log N = (2,8 \pm 0,1) - (1,1 \pm 0,1)M_L$$

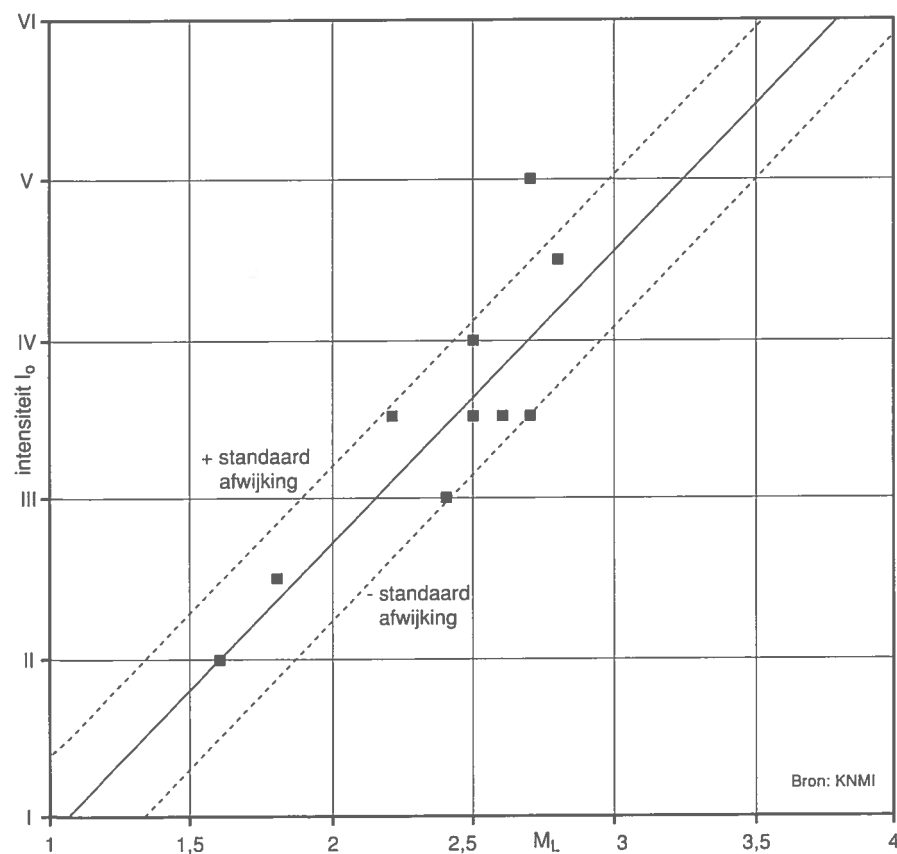
$$\text{voor } 1,5 \leq M_L \leq 2,5$$

De totale curve is gebaseerd op 24 aardbevingen. De onzekerheid in de bepaling van de magnitudes is ca. $\pm 0,2$ magnitude eenheid. Doordat de magnitudes klein zijn kan er geen ijking plaatsvinden met behulp van buitenlandse stations. De magnitudes zijn bepaald met de methode beschreven in het KNMI rapport "Seismische analyse van de aardbevingen bij Geelbroek op 25 april 1991, Eleveld op 8 augustus 1991 en Middelstum op 5 december 1991", De Bilt, maart 1992.

De berekende b -waarde voor Noord-Nederland is 1,1. Deze waarde is goed vergelijkbaar met andere gebieden waar geïnduceerde aardbevingen zijn opgetreden. Bijvoorbeeld voor aardbevingen bij Lacq aan de noordzijde van de Pyreneeën, die door gaswinning geïnduceerd zijn, is de b -waarde vanaf 1980 tot 1990 gestegen van ongeveer 0,6 tot 1,1. De b -waarde voor tektonische aardbevingen in heel Nederland is 0,67. Er is dus een duidelijk verschil in de



figuur 18: Cumulatief jaarlijks aantal aardbevingen (N) als functie van de lokale magnitude (M_L) voor Nederland.



figuur 19: Intensiteit in het epicentrale gebied (I_0) uitgezet tegen de lokale magnitude (M_L).

b-waarde voor aardbevingen in Noord-Nederland en tektonische aardbevingen in Nederland als geheel.

In de waargenomen cumulatieve frequentie-magnitude relatie treedt een afbuiging van de kromme op en deze nadert asymptotisch naar de maximaal mogelijke magnitude. De maximale beving ligt doorgaans ongeveer 0,75 magnitude-eenheid voorbij het punt waar de curve afbuigt en is een orde van 0,5 magnitude-eenheid groter dan de maximaal opgetreden magnitude. Wanneer deze twee standaardregels worden toegepast is de maximale magnitude voor Noord-Nederland ongeveer 3,3.

De maximale magnitude kan ook worden bepaald door de wortel uit de vrijgekomen energie van de optredende aardbevingen uit te zetten tegen de tijd. Dit is gedaan voor de Noordnederlandse bevingen in de periode 1986-1993. Uit deze berekeningen volgt een maximale magnitude van 3,4.

5.4 Magnitude-intensiteit relatie Noord-Nederland

Om de gevolgen van aardbevingen in Noord-Nederland te bepalen geeft de verdeling van de magnitudes onvoldoende informatie. Het begrip intensiteit is in dit verband beter geschikt. De relatie tussen magnitude en de intensiteit in het epicentrale gebied I_0 voor de aardbevingen in Noord-Nederland voor de periode 1986-1993 is weergegeven in figuur 19:

$$I_0 = (-0,9 \pm 0,5) + (1,8 \pm 0,4)M_L$$

Het epicentrale gebied waarin I_0 wordt waargenomen is voor ondiepe aardbevingen klein, in de orde van enkele vierkante kilometers. De spreiding van de meetwaarden in figuur 19 wordt voor een klein deel veroorzaakt door meetfouten in de magnitude- en intensiteit-bepaling van een beving. Voor een groot deel is de spreiding het gevolg van de verschillende dieptes waarop de bevingen plaatsvonden en de variatie in bodemgesteldheid.

De aardbeving van Purmerend in 1989 met $M_L = 2,7$ en intensiteit V vormt in dit verband een aardig voorbeeld, waarbij de geringe haarddiepte (1,2 km) en de ongeconsolideerde sedimenten ter plaatse een verklaring vormen voor de relatief grote intensiteit. Wanneer de relatie tussen magnitude en intensiteit wordt gebruikt voor de extrapolatie naar grotere magnitudes is de spreiding die in figuur 19 kan worden afgelezen dus van essentieel belang. Voor de theoretisch maximale magnitude 3,3 is de bijbehorende intensiteit gemiddeld dus ongeveer V. De spreiding is groter dan een 1/2 intensiteitseenheid en is in figuur 19 aangegeven met een stippellijn. Het is gebruikelijk dat bij de intensiteit de spreiding wordt opgeteld voor een schatting van de maximaal te verwachten intensiteit. De maximale intensiteit is dus V-VI.

Een intensiteit V-VI wil zeggen dat gevolgen zoals beschreven bij intensiteit V voorkomen, maar dat ook in enkele gevallen gevolgen met een intensiteit VI te verwachten zijn. De gevolgen worden waargenomen in het overgangsgebied tussen intensiteit V en VI.

5.5 Schade als gevolg van aardbevingen in Noord-Nederland

De schade als gevolg van aardbevingen kan worden bepaald met de European Macroseismic Scale 1992 (EMS schaal, de bijgewerkte MSK-schaal door Grünthal (Ed.), 1993).

Bij intensiteit V treedt verwaarloosbare tot lichte schade op aan relatief weinig gebouwen en bij intensiteit VI treedt verwaarloosbare tot lichte schade op aan veel gebouwen en matige schade aan relatief weinig gebouwen.

Dus bij een theoretisch maximaal mogelijke intensiteit V-VI kan er verwaarloosbare tot lichte schade optreden aan betrekkelijk veel gebouwen en matige schade aan zeer weinig gebouwen.

De EMS schaal is gebaseerd op data uit heel Europa. In Nederland wordt ongetwijfeld beter gebouwd dan gemiddeld in Europa, waardoor bovengenoemde schade waarschijnlijk iets te hoog is ingeschat. Toch is bij intensiteit V-VI lichte niet-structurele schade aan kwetsbare gebouwen niet uit te sluiten. De bouwwijze is in belangrijke mate bepalend voor de omvang van de schade. In Nederland wordt tot op heden bij het bouwen geen rekening gehouden met aardbevingen (NEN 6702).

Bovengenoemde schade is gekoppeld aan de maximaal mogelijke intensiteit V-VI en is dus tevens de maximaal mogelijke schade die kan optreden. De kans dat deze schade optreedt is verwaarloosbaar klein.

Volgens de EMS-schaal treedt er bij intensiteiten vanaf V pas schade op. Bij een magnitude van 3,0 op de schaal van Richter hoort een schatting van intensiteit IV-V, maximaal V. De kans op een magnitude 3,0 voor Noord-Nederland is ongeveer 1% tot 0,1% per jaar, zie figuur 18.

Omdat Nederlandse normen voor schade ten gevolge van aardbevingen nog niet zijn opgesteld, zijn Duitse Normen toegepast voor Noord-Nederland. Noord-Nederland en Noord-Duitsland zijn in geologisch en geofysisch opzicht vergelijkbaar. Bij een maximaal te verwachten intensiteit V-VI kunnen horizontale pieksnelheden aan bouwwerken optreden van 4-8 mm/sec. Volgens de Duitse norm DIN 4150, deel 3 treedt er dan mogelijk lichte schade op aan kwetsbare gebouwen. Kwetsbare gebouwen in dit verband zijn gebouwen die door hun bouwwijze ook bij relatief geringere versnellingen schade kunnen oplopen. Historische panden kunnen bijvoorbeeld vallen onder deze categorie, evenals bouwwerken van losgestapelde stenen of met slechte voegmortel.

In hoeverre de hierboven geschetste gevolgen ook daadwerkelijk zullen optreden is onzeker. De resultaten zijn verkregen uit een statistische extrapolatie van de voorhanden seismische gegevens. Wanneer meer data beschikbaar komen, kunnen er nauwkeuriger schattingen van de gevolgen gemaakt worden.

5.6 Boorgatseismometer Finsterwolde

Zoals uit de algemene inleiding al duidelijk naar voren is gekomen is de plaatsing van een seismometer in een boorgat een effectieve methode om bodemruis te onderdrukken.

Ervaring van onderzoekers leert dat reducties in ruis van een factor 50 mogelijk zijn bij een frequentie van 10 Hz. Bij lagere frequenties is de winst kleiner overeenkomstig een eenvoudig theoretisch model. Zo is bij 1 Hz nog slechts een winst van een factor 5 te behalen. Een en ander hangt sterk af van de geomechanische eigenschappen van de bodem ter plaatse. Het uitgangspunt van het experiment is dus de bestudering van de bodemruis die met de diepte afneemt. Met name de variatie van de bodemruis in tijd is belangrijk. Zo is de ruis in de winter sterker evenals gedurende een werkdag. De noodzaak tot het experiment is gelegen in de voorbereiding

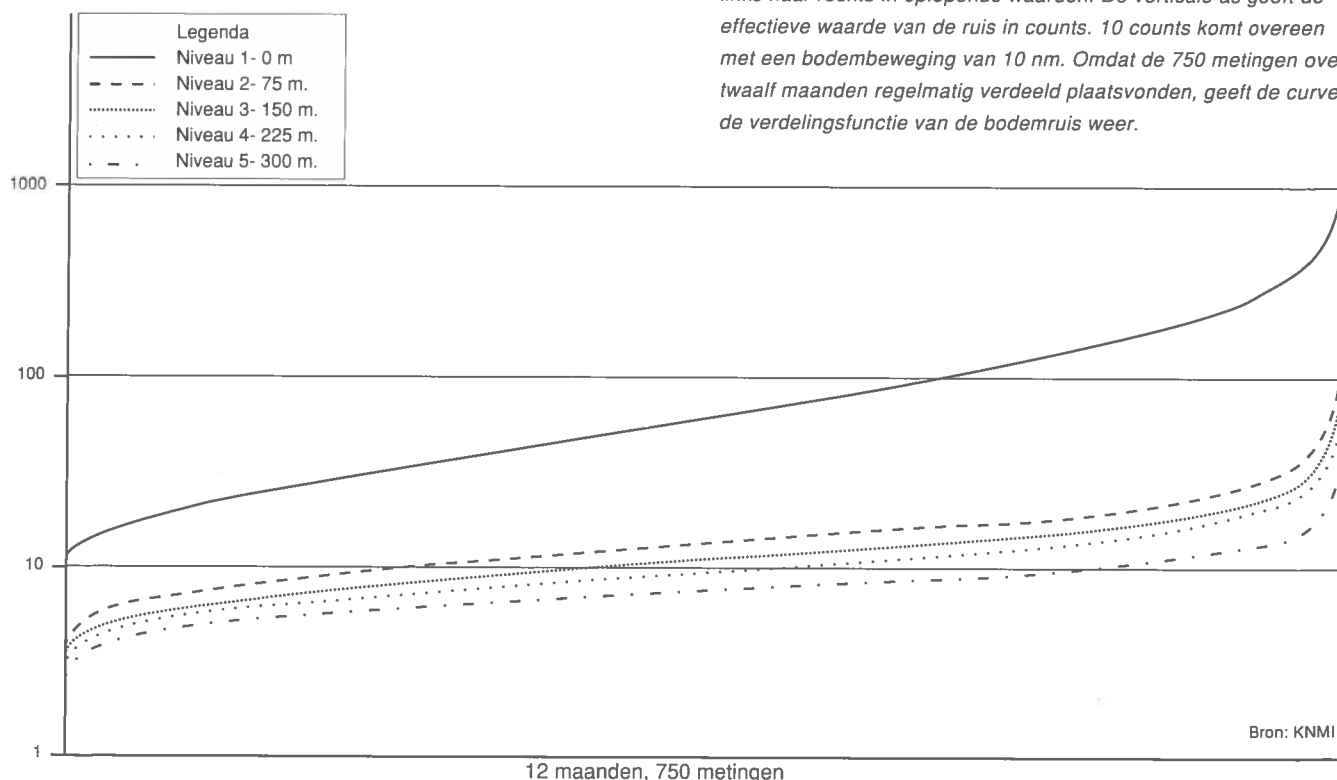
tot een effectief ontwerp van seismische netwerken. Deze netwerken zijn bedoeld om aardbevingen in een bepaald gebied zo zorgvuldig mogelijk te registreren.

Het netwerk van 6 seismometers rond Assen heeft in dit verband model gestaan voor de registratie in een gebied van ca. 100 km². Voor het volgen van kleine aardbevingen in een veel groter gebied zou de oplossing zoals die destijds in 1987 voor het gasveld Eleveld is gekozen niet voldoen. Bovendien heeft het netwerk rond Assen geleerd dat horizontale seismometers, als aanvulling op de verticale instrumenten, noodzakelijk zijn. Daarnaast is gebleken hoe belangrijk het is de seismometers gevoelig te maken voor hoge frequenties tot 25 Hz.

Het Finsterwolde experiment heeft in een later stadium ook de bedoeling gehad om te verifiëren of ook zeer kleine aardbevingen, kleiner dan magnitude 2, door de boorgatseismometers gedetecteerd konden worden. Dit is met name gedaan omdat er geen kleine aardbevingen met het Assen netwerk geregistreerd werden zoals theoretisch op grond van de Gutenberg-Richter relatie wel te verwachten is. Het spreekt vanzelf dat deze twee onderwerpen ten nauwste met elkaar verbonden zijn. De verhouding van ruis en signaal bepaalt of kleine bevingen wel of niet geregistreerd worden.

figuur 20: De bodemruis in Finsterwolde voor de vijf niveau's waarop zich seismometers bevinden.

Op de horizontale as zijn 750 metingen van de ruis uitgezet van links naar rechts in oplopende waarden. De verticale as geeft de effectieve waarde van de ruis in counts. 10 counts komt overeen met een bodembeweging van 10 nm. Omdat de 750 metingen over twaalf maanden regelmatig verdeeld plaatsvonden, geeft de curve de verdelingsfunctie van de bodemruis weer.



5.7 Ruismetingen

In figuur 20 is de bodemruis in Finsterwolde op verschillende dieptes weergegeven. In alle gevallen is een monotone afname in ruis gemeten naar hogere frequenties. Deze afname wordt zeer algemeen waargenomen in seismische bodemruisstudies. Belangrijk is dat naarmate de seismometers zich dieper onder het oppervlak bevinden de afname met de frequentie groter wordt. Zo is er bij 2 Hz een ruis reductie van gemiddeld een factor 5 tussen oppervlakte instrumenten en de instrumenten op 300 meter, maar bij 20 Hz bedraagt de ruisreductie gemiddeld een factor 30. Het is opvallend dat de reductie in ruis al op een diepte van 75 meter zeer substantieel is. Bovendien is de variatie in de ruis van de oppervlakte seismometers veel groter dan voor de overige instrumenten. De variatie is tijd-afhankelijk als gevolg van de veranderlijkheid van weer en wind enerzijds, de verkeersdrukte en de industriële activiteit anderzijds. Op enkele zeer rustige momenten zoals een windstille zomernacht bereikt de ruis van de oppervlakte instrumenten waarden die voor de overige instrumenten op grotere diepte gemiddeld zijn. Naast de geleidelijke veranderingen in ruisniveau, fluctueert de ruis ook op korte tijdschalen. Dit zijn typisch die gevallen waar de ruisbron, zoals voorbij rijdende auto's en landbouwmachines, zich dicht bij de seismometers bevindt. De signalen van deze bronnen bereiken zelden het 300 meter niveau. Dit laatste geldt echter niet voor verstoringen van atmosferische aard; zoals sterke luchtdruk variaties, "sonic booms". Doordat deze verstoringen zich uitstrekken over een veel groter gebied dan de puntbelastingen, zoals bij verkeer, dringen deze atmosferische verstoringen ook wat dieper door in de bodem. Hoewel de kans klein is dat deze verstoringen interfereren met aardbevingssignalen kunnen zij in de meeste gevallen wel aanleiding geven tot valse detecties door het automatische detectiesysteem.

6 Geologisch model van het gasveld Eleveld

6.1 Algemene gegevens

Het gasveld Eleveld is in 1971 ontdekt en ligt dicht bij het dorp Eleveld op ongeveer 3 kilometer ten zuiden van Assen (figuur 21). Het gasvoerende Rotliegend reservoir (Slochteren Zandsteen Formatie) bevindt zich op een diepte van ongeveer 3200 m en bestaat uit een afwisseling van zandsteen en conglomeraat. In de top van het reservoir vormen de conglomeraten de voornaamste lithologie terwijl de basis hoofdzakelijk uit zandsteen bestaat. De gemiddelde dikte van het reservoir is ongeveer 100 m en de gemiddelde porositeit bedraagt 10%.

Gebaseerd op het seismisch onderzoek van het veld blijkt dat, behalve aan de noordoost-zijde, het veld geheel begrensd is door breuken. Ook binnen het veld zijn er breuken in het Rotliegend reservoir. Er is enige onzekerheid over de exacte positie van de breuken, doordat alleen 2-D seismisch onderzoek beschikbaar is.

In het noordoosten wordt het veld begrensd door het watervoerende deel van het reservoir. Uit het drukverloop volgt dat van de aquifer geen grote drukondersteuning verwacht kan worden en dat de breuk tussen de boringen ELV-101 en ELV-102 geen of een uiterst geringe barrière vormt voor drukcommunicatie in het veld.

Het geologische en daarmee samenhangende geomechanische model van het Eleveld gasveld en zijn omgeving is gebaseerd op de gegevens van de putten Eleveld 101 en 102, op omliggende putten en seismische gegevens.

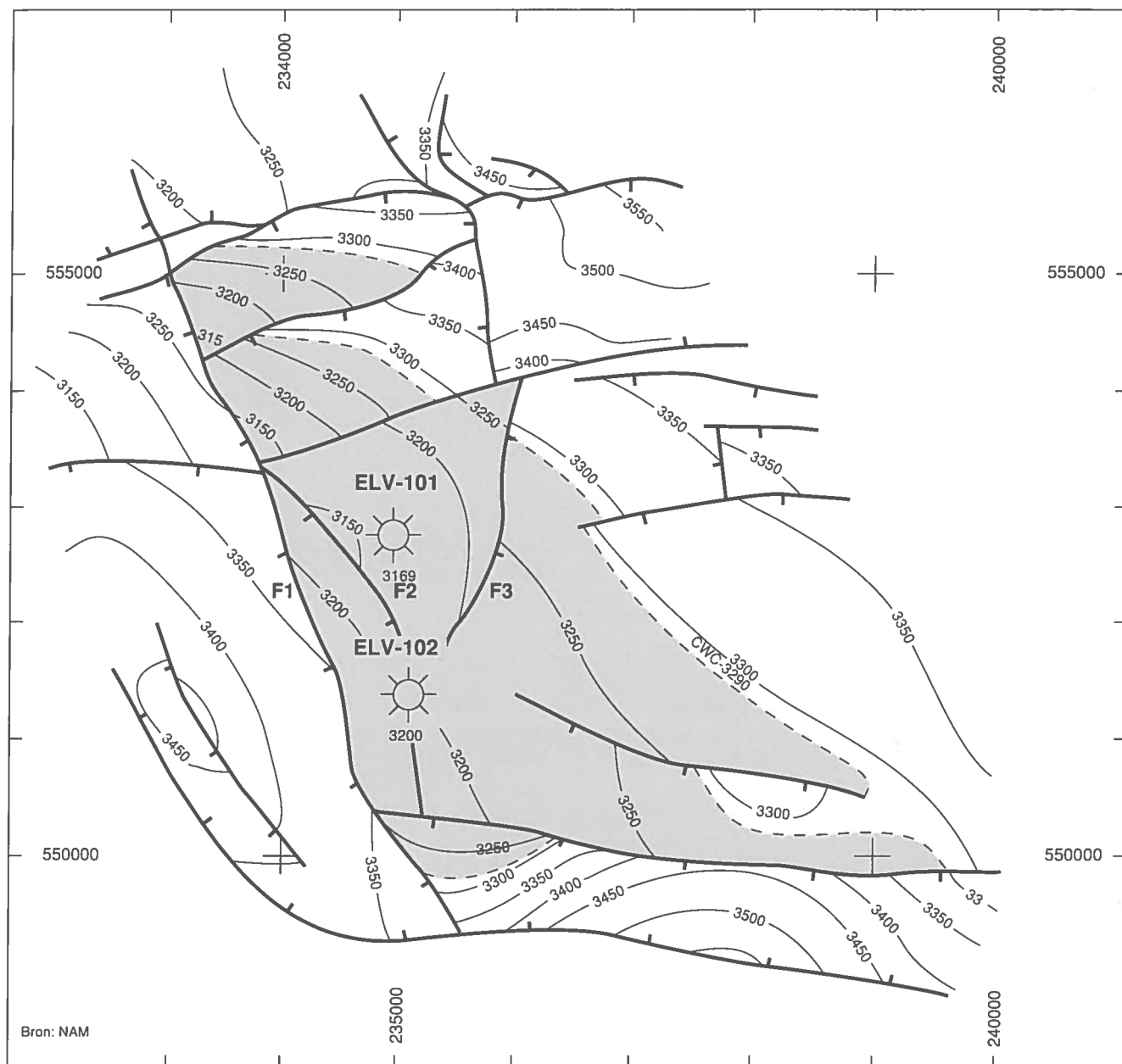
De figuren 22, 23 en 24 laten drie geologische profielen over het Eleveld gasveld en de directe omgeving zien.

Figuur 22 is een gedetailleerd oost-west profiel over het Eleveld reservoir.

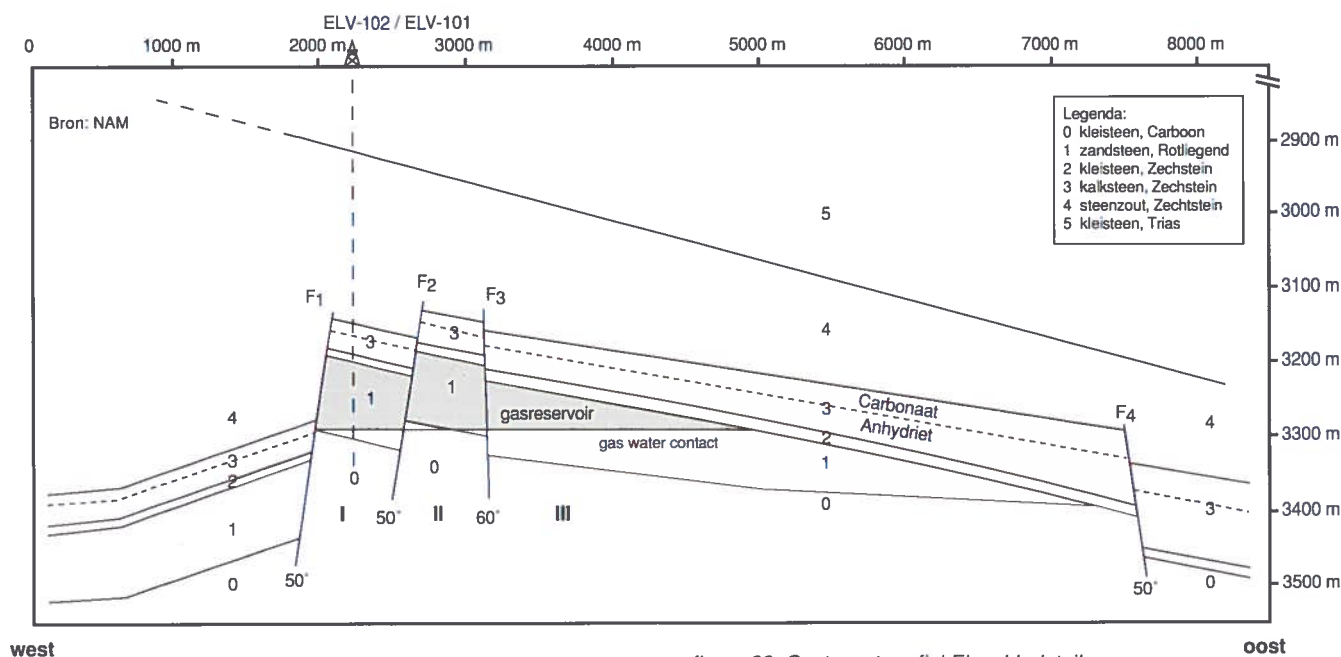
Figuur 23 en figuur 24 geven grootschalige oost-west en noord-zuid lopende profielen over het Eleveld gasveld en haar omgeving weer. Hiervoor zijn de aanwezige gesteente-eenheden deels samengevoegd. Bij de constructie van het noord-zuid profiel waren geen seismische gegevens voorhanden in het gebied van Assen. Dit deel van het profiel is dan ook geïnterpoleerd, gebaseerd op kennis over de geologie rondom Assen.

6.2 Lithologie en geomechanische eenheden

De geologische opeenvolging van gesteenten, zoals beschreven in hoofdstuk 3, is voor de specifieke omgeving van Eleveld vertaald naar een tiental geomechanische eenheden. Hierbij is vooral gebruik gemaakt van een combinatie van de geologische beschrijving van de formaties en metingen in de beide Eleveld putten. Aan de hand van boorgatgegevens zijn de eenheden onderscheiden op basis van hun dichtheid en de hoeveelheid natuurlijke radioactieve



figuur 21: Begrenzing van het gasveld Eleveld. De contourlijnen geven de diepte in meters van de bovenzijde van het reservoir aan. De aanwezige breuken zijn met hun afschuifrichting aangegeven.



figuur 22: Oost-west profiel Elefeld: detail.
Voor de beschrijving van de eenheden (nummering) zie tekst.

straling van het gesteente. Deze meting geeft een relatieve indicatie van de hoeveelheid kleiig materiaal in het gesteente en is geschikt om verschillen in lithologie zichtbaar te maken.

Voor elke eenheid is een gemiddelde dikte bepaald. Tevens is een beschrijving gegeven van het te verwachten mechanische gedrag. Dikteverschillen tussen ELV-101 en ELV-102 zijn klein. Bovendien is aangegeven of de overgang tussen de eenheden abrupt of geleidelijk plaatsvindt. Bijzondere aandacht is besteed aan eenheid 2 die een mechanisch zwakke laag vormt aan de top van het reservoir (eenheid 1). De eenheden zijn nader gekarakteriseerd m.b.v. toekenning van waarden aan de relevante mechanische parameters. Deze zijn gebruikt in de modellering van Elefeld.

In het kader van de studie naar de mogelijkheid van opslag van radioactief afval in zoutkoepels in Nederland heeft een uitgebreid literatuuronderzoek geleid tot een overzicht van de waarden van een aantal van de mechanische parameters. Hoewel deze studie zich voornamelijk concentreert op het mechanisch gedrag van de diverse vormen van zoutafzettingen, is het rapport als een leidraad gebruikt bij de bepaling van de mechanische parameters van de onderscheiden eenheden. De gemiddelde dichtheid van de geomechanische eenheden is afgeleid uit de boringen ELV-101 en ELV-102. Een overzicht van de parameters wordt gegeven in tabel 2.

eenheid 0

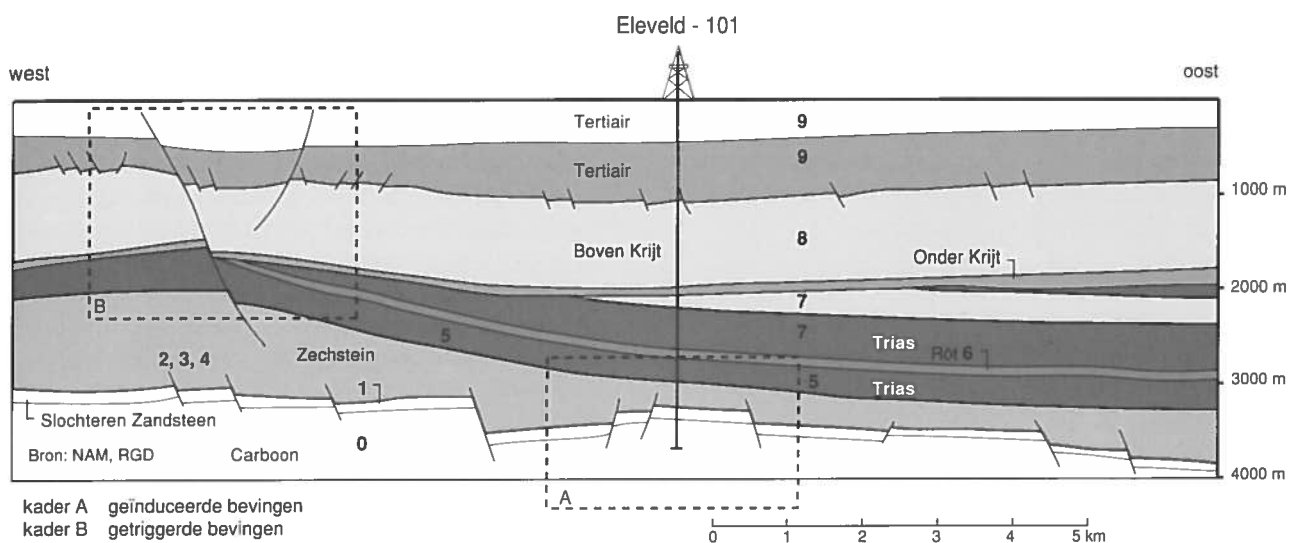
In het geologisch model van het gasveld Elefeld vormen de overwegend uit kleisteen bestaande afzettingen van de Limburg Groep (Laat-Carboon) de basis. De top van de Limburg Groep bestaat in het Elefeld gasveld voornamelijk uit harde kleisteen (schalie) met enkele meer zandige lagen.

eenheid 1

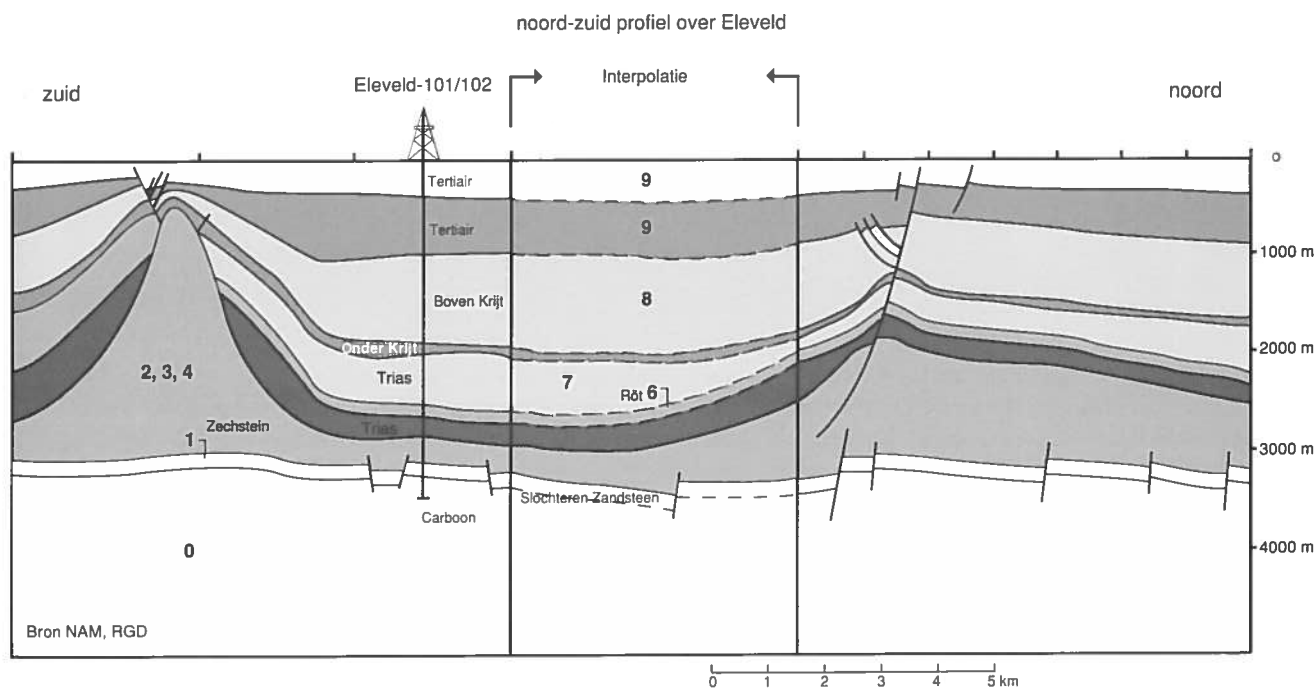
Geomechanische eenheid 1 is de Slochteren Zandsteen Formatie, het reservoirgesteente van het gasveld Elefeld. Een deel van de afgezette Slochteren Zandsteen Formatie is grofkorrelig en verkit tot een compact hard conglomeraat. De totale dikte van de in de boring Elefeld 101 aangetroffen zandstenen en conglomeraten bedraagt 100 meter. De hoeveelheid conglomeraat neemt naar de top toe. De overgang van eenheid 0 naar eenheid 1 is abrupt. De waarden voor de elastische constanten zijn voor deze eenheid ontleend aan het Groningen veld.

Overzicht van eenheid 2, 3 en 4

De eenheden 2, 3 en 4 behoren tot de afzettingen van de Zechstein Groep. Deze afzettingen zijn gevormd gedurende een aantal indampingscycli van de Zechsteinzee, waarbij veel zout is afgezet en vormen daardoor een complexe opeenvolging van gesteenten. Na afzetting van de Zechstein Groep heeft gedurende latere geologische perioden zoutvloeï plaatsgevonden, waardoor de dikte van het Zechstein zout van plaats tot plaats sterk kan



figuur 23: Oost-west profiel Eleveld.
De nummers zijn terug te vinden in tabel 2
op pagina 49.



figuur 24: Noord-zuid profiel Eleveld.

verschillen. Lokaal zijn koepelvormige verdikkingen (zoutkussens) ontstaan, op andere plaatsen is het zout door de bovenliggende gesteenten heen gebroken. Ten oosten en ten zuiden van het Eleveld gasveld worden zoutkoepels aangetroffen (Gasselte-Drouwen resp. Hooghalen). Zoutkussens zijn ook gelegen ten noorden en ten westen van het gasveld (figuren 23, 24).

eenheid 2

De overgang van eenheid 1 naar eenheid 2 is abrupt. Het onderste deel van eenheid 2 wordt gevormd door de Koperschalie, een dunne bitumineuze schalie, gevolgd door kleiige kalksteen die aan de top geleidelijk overgaat in kristallijne dolomiet. Anhydriet is door de gehele eenheid aanwezig. De totale dikte van de eenheid is ± 11 meter. De waarden voor de mechanische parameters zijn uit waarden voor dolomiet, schalie en anhydriet gemiddeld.

eenheid 3

De top van eenheid 2 gaat geleidelijk over naar eenheid 3. Eenheid 3 bestaat uit anhydriet en carbonaat. De totale dikte bedraagt 40 meter. Naar de top van het anhydriet neemt de hoeveelheid dolomiet toe. Voor deze eenheid is een combinatie van de mechanische parameters gebruikt voor anhydriet, kalksteen en dolomiet. De waargenomen dichtheid rechtvaardigt een combinatie van bovengenoemde data.

eenheid 4

De grens tussen eenheid 3 en eenheid 4 is scherp. Eenheid 4 bestaat bijna geheel uit steenzout en heeft een totale dikte van ± 230 meter. In de grootschalige profielen zijn de geomechanische eenheden 2, 3 en 4 niet onderscheiden.

eenheid 5

De Trias afzettingen boven het Eleveld gasveld zijn in drie verschillende gesteente-eenheden onderscheiden. De eerste eenheid, eenheid 5, bestaat overwegend uit de afzettingen van de Onder-Bontzandsteen Formatie met een dikte van ca. 460 meter. De basis van de eenheid bestaat uit siltige, anhydritische kleisteen. Gezien de grote hoeveelheid kleisteen is deze bepalend voor de lithologie. De overgang tussen eenheid 4 en 5 is abrupt.

eenheid 6

Gedurende de Midden-Trias periode worden de afzettingen van de Röt en de Muschelkalk Formatie gevormd. Mariene sedimenten worden afgewisseld door zoutlagen, ontstaan tijdens enkele fasen van indamping. Eenheid 6 wordt gevormd door de Hoofd-Röt Evaporiet en heeft een dikte van 110 meter. De eenheid bestaat uit een massieve haliet afzetting met aan de top enkele anhydriet banken. De overgang tussen eenheid 5 en eenheid 6 is abrupt.

eenheid 7

De basis van eenheid 7 bestaat uit Röt afzettingen gevolgd door die van de Muschelkalk Formatie welke bestaat uit een afwisseling van (mariene) mergels, dolomitische mergels, dolomieten, kalkstenen en carbonaat houdende kleistenen. In de putten ELV-101 en ELV-102 zijn door erosie geen afzettingen aangetroffen uit de Laat-Trias en de Jura periode. Op de grootschalige profielen daarentegen zijn, gebaseerd op de interpretatie van de seismische gegevens, wel gebieden aangegeven waar eenheid 7 afzettingen uit het Laat-Trias en Jura bevat. Het derde deel van eenheid 7 omvat afzettingen van de Rijnland Groep, overwegend kleisteen geleidelijk overgaand in mergel.

De overgang van eenheid 6 naar eenheid 7 is abrupt. De lithologie van het eerste deel van de eenheid vertoont overeenkomst met de afzettingen uit het Midden-Trias. Om deze reden worden aan beide eenheden dezelfde mechanische eigenschappen toegekend.

eenheid 8

De overgang van eenheid 7 naar eenheid 8 is geleidelijk. Eenheid 8 bestaat geheel uit sedimenten van de Krijtkalk Groep met een totale dikte van 895 meter en bestaat aan de basis uit kalksteen naar boven toe overgaand in mergelige kalksteen.

eenheid 9

De overgang van eenheid 8 naar eenheid 9 is abrupt. Geomechanische eenheid 9 wordt gevormd door afzetting van het Tertiair en Kwartair met een totale dikte van 1030 meter. Deze eenheid bestaat uit grote hoeveelheden licht kalkige tot siltige klei met een enkel kalkig fijnzandig pakket.

tabel 2: Overzicht geomechanische eenheden.

Geologie	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Periode	Kwartair+Tertiair	Boven-Krijt	Onder-Krijt tot Midden-Trias	Midden-Trias	Onder-Trias	Perm	Perm	Perm	Perm	Carboon
Groep/Formatie	Noordzee Groep	Krijtkalk Groep	Rijnlandgroep tot Muschelkalk Formatie	Röt Formatie	Onder-Bontzandsteen Formatie	Zechstein Groep	Zechstein Groep	Zechstein Groep	Slochteren Zandsteen Formatie	Limburg Groep
Lithologie	Klei	Kalksteen	Kleisteel	Steenzout	Kleisteel	Steenzout	Kalksteen	Kleisteel	Zandsteen	Kleisteel
Parameters	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Elasticiteits Modulus E (G Pa)	0.5	10	20	30	28	30	60	20	15	40
Compressie Modulus K (G Pa)	0.4	5	13	25	19	25	50	13	10	22
Glijdings Modulus G (G Pa)	0.2	4	8	12	11	12	23	8	6	17
Cohesie (M Pa)	0	3	5	-	5	-	5	5	5	5
Dichtheid (kg/m ³)	1960	2300	2650	2100	2600	2100	2650	2800	2550	2700
Wrijvingshoek ϕ (°)	20	30	20	-	20	-	30	30	30	30
K ₀	0.4	0.4	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4
Doorlatendheid mD (milli Darcy)									250	

7 Geomechanische modelberekeningen Eleveld

7.1 Inleiding en probleemstelling

In een numerieke modelstudie is nagegaan in hoeverre er een relatie bestaat tussen geconstateerde bevingen in Noord-Nederland en de plaatselijke gaswinning. In deze studie is gebruik gemaakt van de aanwezige kennis en gegevens over lithologische spanningen, geologische opbouw, materiaalgedrag en gasproductie. Informatie hierover is in de voorgaande hoofdstukken te vinden.

Het onderzoek is opgedeeld in drie onderdelen:

- De definitie van de lokale geologische structuur, het regionale spanningsveld en de mechanische eigenschappen van de gesteentes rond het gasveld Eleveld (studie VU Amsterdam en RGD Haarlem).
- De modellering van het mechanisch gedrag van het gasreservoir en de directe omgeving, waarbij wordt uitgegaan van realistische mechanische eigenschappen, geologische structuren en lithologische spanningen (studie TU-Delft).
- De analyse van de gevolgen van de gaswinning te Eleveld op breukstructuren in de wijde omgeving, waarbij rekening is gehouden met het plastisch gedrag van de zoutformatie (studie Grondmechanica Delft).

Voor het eerste onderdeel wordt verwezen naar hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de numerieke modelstudies van het reservoir Eleveld en de omgeving beschreven.

Er zijn geen geijkte modellen beschikbaar om het gestelde probleem in al zijn facetten dynamisch op te lossen. De numerieke modelstudies zijn daarom statisch uitgevoerd. Gekozen is voor een tweedimensionale aanpak. Daarmee wordt voldoende inzicht opgedaan om tot een onderbouwde uitspraak te komen. De uitgevoerde berekeningen geven inzicht in de spanningsopbouw, die relevant is voor het moment van verschuiven, en in de mate waarin er verschuiving kan optreden. Vervolgens is op basis van ervaring elders in de wereld het dynamisch effect bepaald gebruik makend van beschikbare empirische formules, zoals die in hoofdstuk 4 zijn beschreven.

7.2 Beschrijving gasveld Eleveld

Voor de numerieke analyse is het gasveld Eleveld gekozen. Het is een relatief klein veld met enkele markante breukvlakken waarbij verschillende verschijnselen, zoals spanningsreductie, boogwerking en spanningsrotatie, een rol spelen. Bovendien wordt het gasveld van boven afgesloten door een zoutlaag en bevindt zich aan de westelijke kant een zoutrug, zodat ook effecten van het plastisch gedrag van zoutformaties bestudeerd kunnen worden. Het gasveld Eleveld is als uitgangspunt voor de berekeningen gekozen

omdat van dit veld de meest nauwkeurige aardbevingsgegevens bekend zijn en omdat het model staat voor veel velden in Noordoost-Nederland.

Voor de beschrijving van het gasveld wordt verwezen naar figuur 21 en figuur 22. De geologische structuur is aangegeven in figuur 23 en figuur 24.

Voor de numerieke modellering is een tweedimensionale analyse uitgevoerd. Gekozen is voor een verticale doorsnede van west naar oost, zie figuur 23. In de beschouwde doorsnede bestaat het reservoir zelf uit drie secties, gescheiden door drie breuken, aangeduid met F1, F2, en F3, en het gas- water contact aan de oostelijke zijde, zie figuur 22. De schuifsterkte van de breukvlakken wordt beschreven volgens een Mohr-Coulomb gedrag, waarbij de hoek van interne wrijving varieert van 22° tot 30° en de cohesie op nul wordt gesteld. Er wordt tevens een elastisch beperkte vervorming langs de breuk in rekening gebracht. Voor de gesteentelagen is een elasto-plastisch gedrag aangenomen waarbij is uitgegaan van materiaaleigenschappen overeenkomstig de waarden in tabel 2 (hoofdstuk 6). Het zout is als plastisch materiaal gemodelleerd zonder cohesie en met een zeer kleine hoek van inwendige wrijving: $\phi = 1^\circ$.

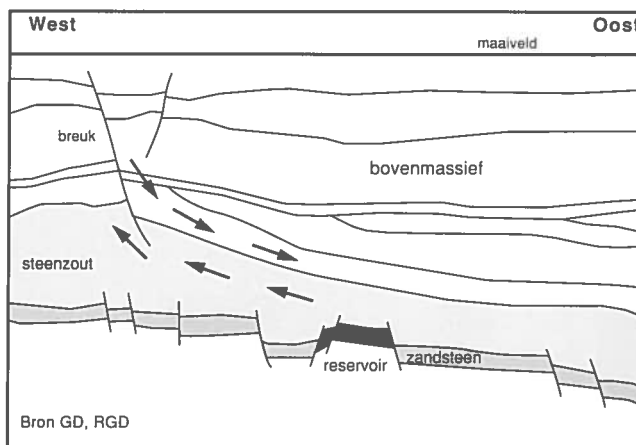
Er is verondersteld dat het gasveld zich gedraagt als een afgesloten reservoir waaruit het gas naar de productieputten stroomt. Er vindt in het gehanteerde model geen toestroming van water uit de omringende gesteentelagen plaats. De gemeten en te verwachten gasdrukverlaging is als basis gebruikt voor de modelberekeningen. De gasdruk is vanaf het begin van de gaswinning in 1975 gedaald van 37,5 MPa tot 11,5 MPa in 1991, terwijl naar verwachting bij het einde van de produktie er nog een druk van 3 MPa resteert.

7.3 De initiële situatie

De initiële situatie is de spanningstoestand voor het begin van de gaswinning. Deze spanningstoestand is een systeem in evenwicht. Spanningen en materiaaleigenschappen bepalen de vorm. De initiële spanningstoestand is een gevolg van het eigen gewicht van de verschillende gesteentelagen en de tektonische spanningen. Deze spanningen zijn het resultaat van grootschalige continentale plaatbewegingen in de aardkorst. In Noord-Nederland zijn deze tektonische spanningen gering. Ze worden geschat op hoogstens 10% van de aanwezige gravitatiespanningen (zie hoofdstuk 3). De verticale effectieve spanning wordt grotendeels bepaald door het gewicht van de bovenliggende lagen. De horizontale effectieve spanning is in Noordoost-Nederland in het algemeen een factor 0,4 tot 0,5 maal de verticale; de factor wordt aangeduid met de K_0 -waarde (zie hoofdstuk 4).

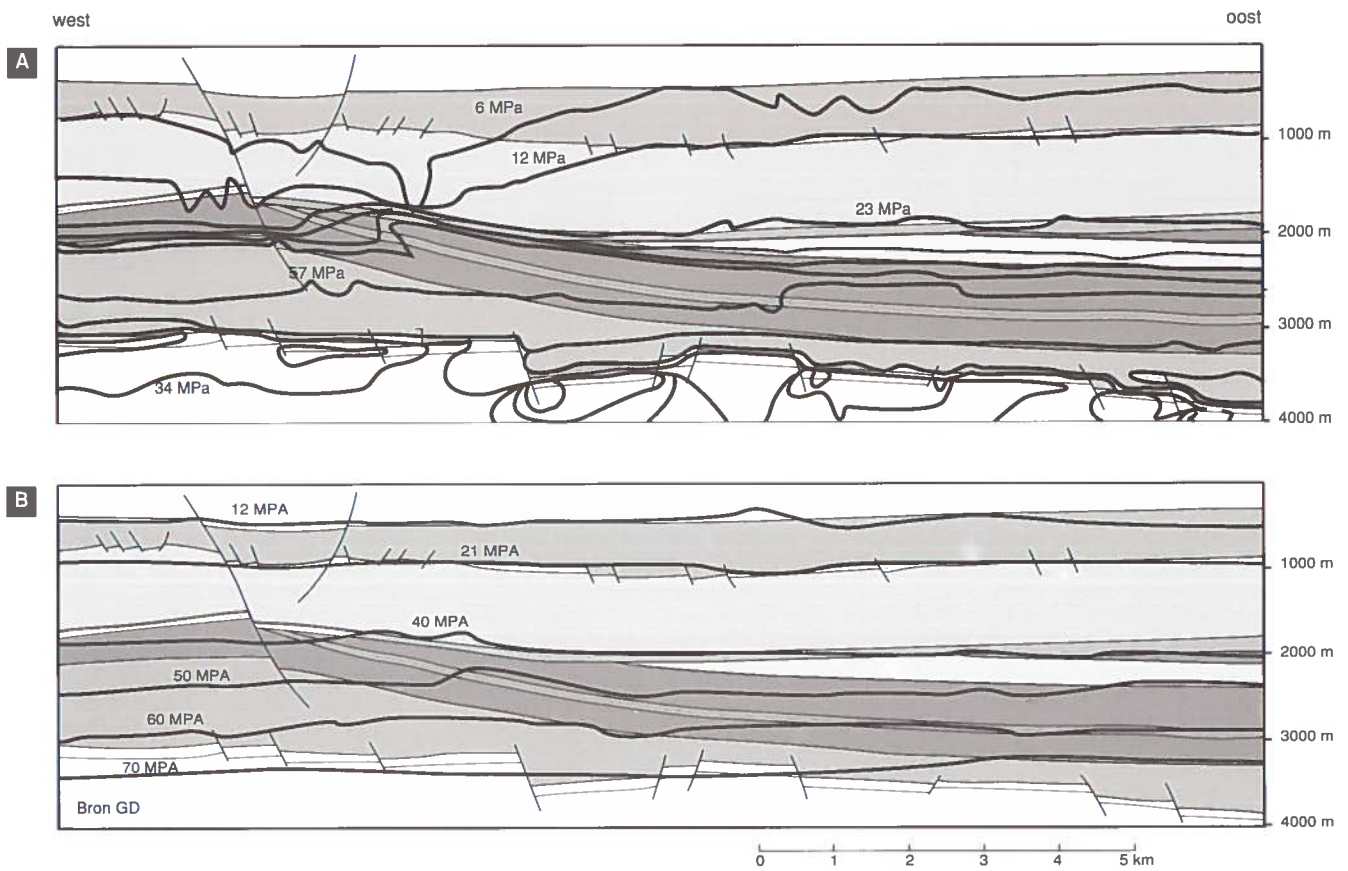
Een consistente initiële spanningstoestand is vervolgens berekend voor de aangegeven geologische structuur

(doorsnede West-Oost, zie figuur 23) door de zwaartekracht "aan te zetten", daarbij gebruik makend van de materiaal-eigenschappen in termen van de compressiemodulus K en de glijdingsmodulus G , zoals die voor de verschillende gesteentelagen zijn vastgesteld (zie tabel 2 van hoofdstuk 6). Tevens is rekening gehouden met de schuifsterkte van de verschillende lagen en bestaande breukvlakken, in termen van de cohesie c en de hoek van interne wrijving ϕ . Aldus is een initieel spanningsveld vastgesteld, dat globaal in overeenstemming is met de veronderstelde waarde voor K_0 . Lokaal wijkt de waarde voor K_0 af door de aanwezigheid van bestaande breuken en laagscheidingen. In de zoutformatie is $K_0=1$, omdat daar de schuifspanningen in de loop van de geologische geschiedenis tot zeer kleine waarden zijn gereduceerd. Een beeld van de initiële situatie is weergegeven in figuur 26. De aanwezigheid van een zoutrug aan de westelijke rand van het reservoir heeft tot gevolg dat boven het zout gelegen gesteentelagen "afglijden" in oostelijke richting en dat het zout omhoog geperst wordt, zie figuur 25. Een gevolg hiervan is dat de initiële effectieve horizontale spanning boven de zoutrug gereduceerd wordt. De berekende initiële situatie toont dit bewegingsmechanisme.



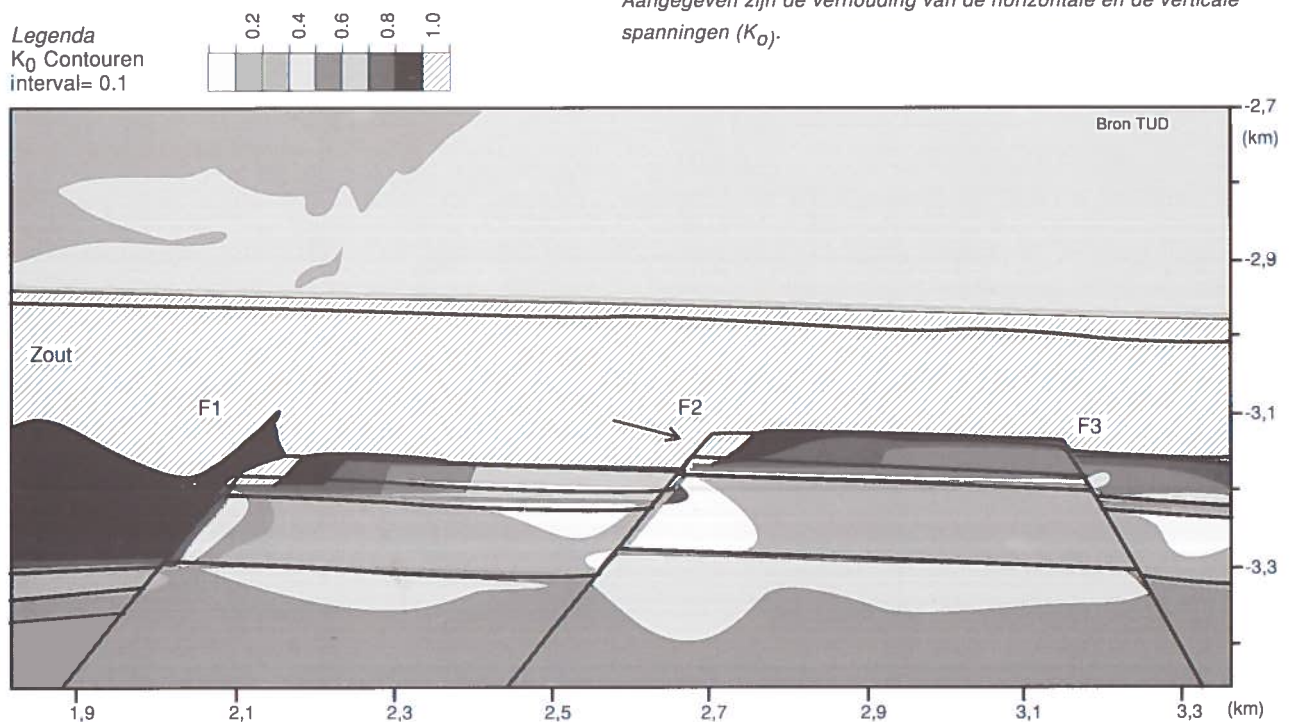
Figuur 25: Effect van de zoutrug op de initiële situatie.

Door het plastisch gedrag van het zout zijn er langs de uitstekende delen van de breukvlakken, waar het zout grenst aan het reservoir, relatief grote horizontale spanningen. Bij breuk F1 neemt de horizontale spanning in het reservoir geleidelijk af. Aan de onderzijde langs breuk F1, waar kleinere horizontale spanningen aanwezig zijn, kan de breuk als het ware "geopend" worden door de horizontale druk van het zout op de zijkant. Eenzelfde situatie doet zich voor bij breuk F2 en bij breuk F3, zie figuur 27. Aangezien de schuifsterkte van breukvlakken wordt bepaald door de actuele normaalspanning, kan een significante horizontale spanningsreductie leiden tot verschuiving. Bij de



Figuur 26: Initiële situatie in de wijde omgeving van het reservoir
Horizontale spanningen (A). Verticale spanningen (B).

Figuur 27: Initiële situatie in de directe omgeving van het reservoir
Aangegeven zijn de verhouding van de horizontale en de verticale
spanningen (K_0).



gasonttrekking kan vooral breuk F2 door compactie geactiveerd worden (zie figuur 13).

7.4 Effect van gaswinning in de directe omgeving van het reservoir

Er zijn veel berekeningen uitgevoerd om de gevoeligheid van de verschillende parameterwaarden op het eindresultaat in beeld te brengen en om inzicht te verkrijgen in de samenhang tussen de essentiële mechanische fenomenen. Deze kunnen te maken hebben met de mobiliteit, de geometrische structuur en het materiaalgedrag.

In figuur 28 zijn schematisch de relatieve verschuivingsmogelijkheden van twee reservoirblokken weergegeven. Er zijn vijf aspecten die bij een differentieële beweging een rol kunnen spelen:

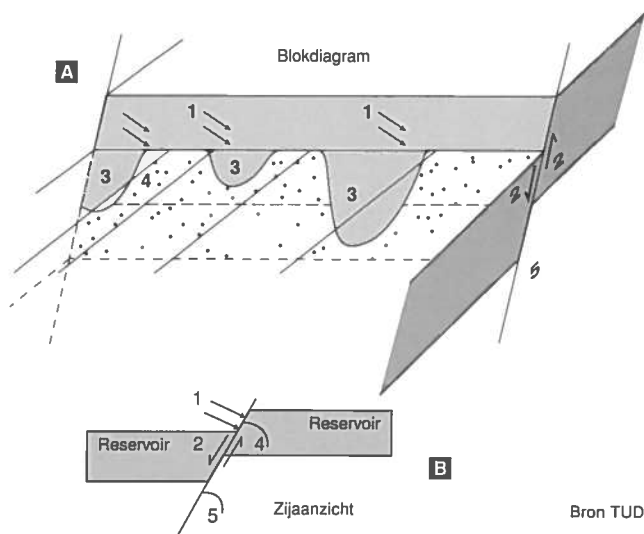
- 1 grote horizontale spanningen op breukvlakdelen die breken kunnen opendruwen
- 2 compactie van een of twee reservoirblokken
- 3 zoutintrusie of kleivulling in de breuk
- 4 oneffenheden of barrières in de breuk
- 5 beweging langs de breuk buiten het reservoir.

Voor het beschouwde gasreservoir Eleveld zijn compactie en dynamisch afschuiven van een barrière in een breukvlak de meest relevante aspecten.

In figuur 29 is een beeld gegeven van de door de gaswinning geïnduceerde verticale verplaatsingen en de schuifvervorming langs de breukvlakken F1, F2 en F3 aan het einde van de productie, het jaar 2035. In de breukvlakken is een wrijvingshoek van 25° aangenomen. Langs breuk F1 treedt een schuifvervorming op aan de onderkant van het reservoir van 2,5 cm. Bij breuk F2 bedraagt dit 5,0 cm, en bij breuk F3 3,6 cm.

Naast de verschuiving is het oppervlak waarover de verplaatsing optreedt en de glijdingsmodulus van belang om het seismisch moment vast te stellen. In figuur 30 is de horizontale spanningsverdeling aangegeven rond breuk F1, zoals die aan het einde van de productieperiode is berekend. De wrijvingshoek in het breukvlak is hier gesteld op 23° . De orde van grootte van de normaalspanning in het breukvlak aan de rand van het reservoir bedraagt 65 MPa. In de richting van het reservoir neemt de horizontale spanning af tot omstreeks 25 MPa. In het breukvlak direct onder het reservoir, waar lokaal een maximale verschuiving van 7,1 cm optreedt, is sprake van een afname van de normaalspanning tot een waarde van 10 MPa.

Afhankelijk van de geologische condities langs het breukvlak manifesteren deze statisch berekende schuifvervormingen



Figuur 28: Mogelijke mechanismen op het breukvlak

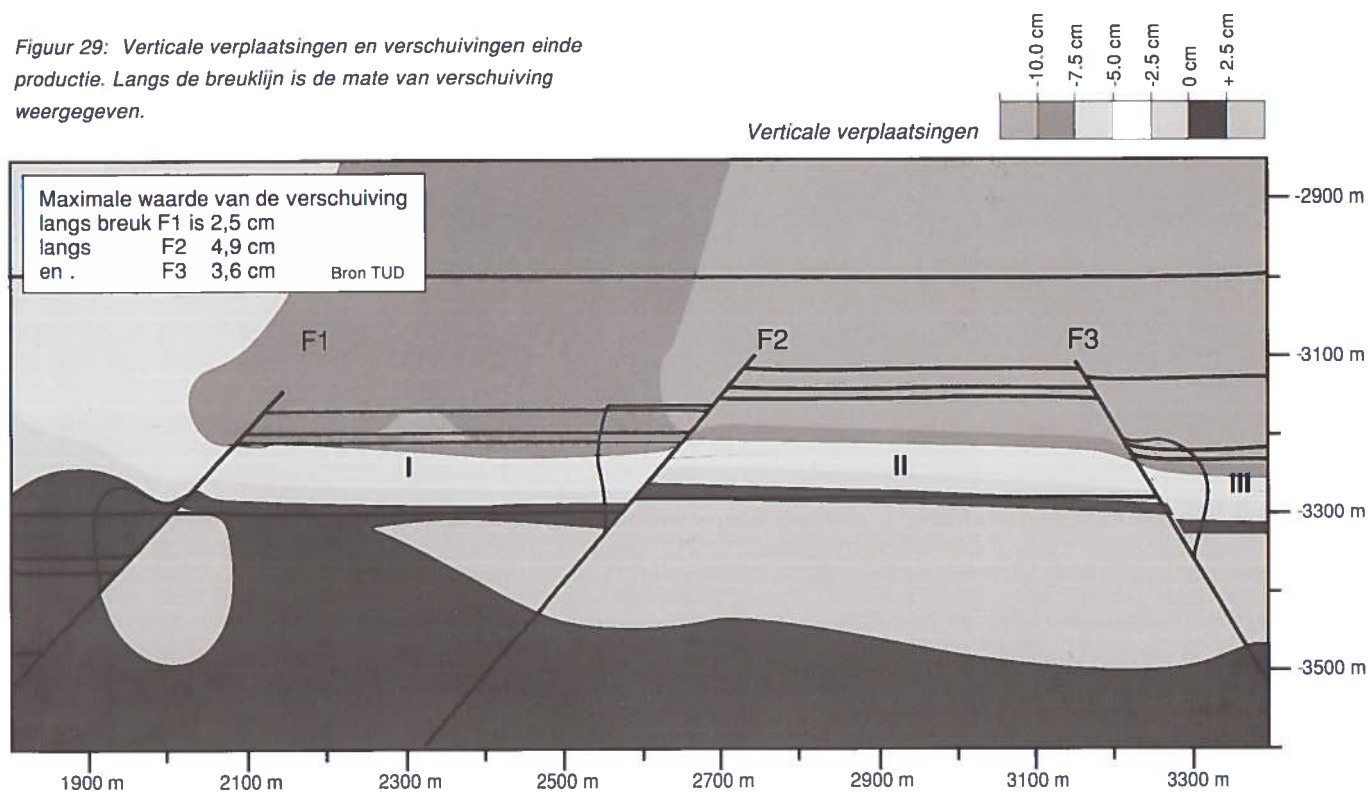
zich als bewegingen, die zich geleidelijk ontwikkelen afhankelijk van het verloop van de gasdrukverlaging in de tijd. Een deel (in de gegeven situatie bij een ϕ van 23° in orde van 15 tot 20%) van de schuifvervorming bestaat uit elastische deformatie. Het restant is een verschuiving, die in bijzondere gevallen als een plotselinge beweging kan optreden. Dit is een bovengrens omdat een breuk door kruip gedeeltelijk kan ontspannen. Als echter plaatselijk de beweging wordt geblokkeerd door oneffenheden, kan daar de maximale verschuiving dynamisch plaats vinden. Bij de interpretatie van de resultaten met betrekking tot aardbevingen is van de bovengrens uitgegaan.

In figuur 31 worden de berekende maximale dynamische verschuivingen (seismische slip) gegeven als functie van de gasdrukverlaging en bij verschillende waarden voor de interne wrijvingshoek ϕ in het breukvlak. Er blijkt een duidelijke relatie te bestaan tussen de drukdaling en de maximale slip die dynamisch kan optreden. Ook blijkt uit figuur 31 dat de drukdaling na 1992 nog relatief weinig extra slip kan veroorzaken.

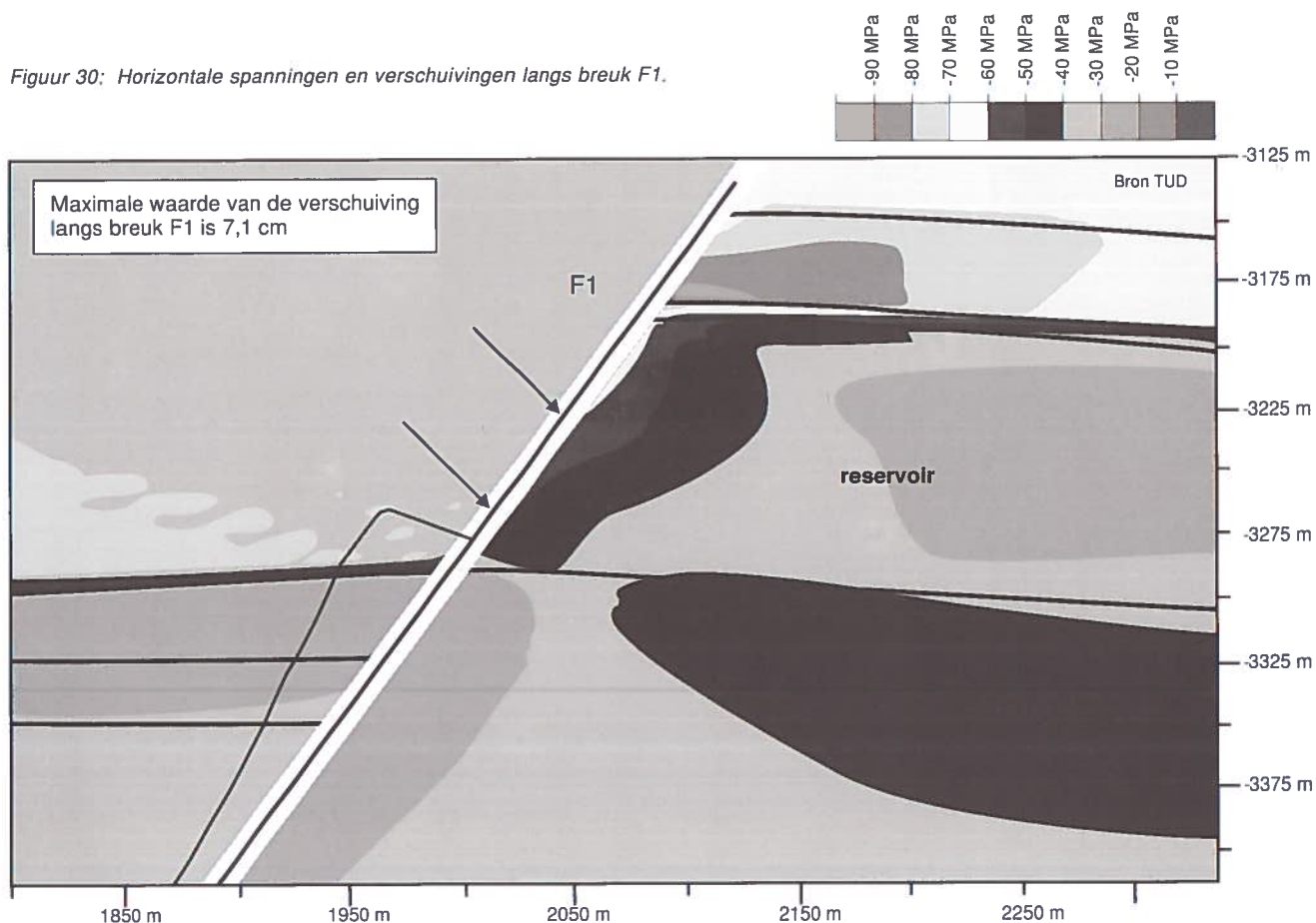
Uit de modelberekeningen is eveneens gebleken dat de maximale dynamische verschuiving groter wordt naarmate de wrijvingshoek langs het breukvlak kleiner wordt aangenomen. Als de wrijvingshoek kleiner is dan 20° zijn de breuken in het gasveld Eleveld in geologische zin niet stabiel. Aangezien er sprake is van geologische rust (zie hoofdstuk 3), zijn wrijvingshoeken kleiner dan 20° niet relevant. Voor de minimale wrijvingshoek in de breuken wordt een marge tussen 20° tot 30° aangehouden, met een meest waarschijnlijke minimale waarde van omstreeks 25° .

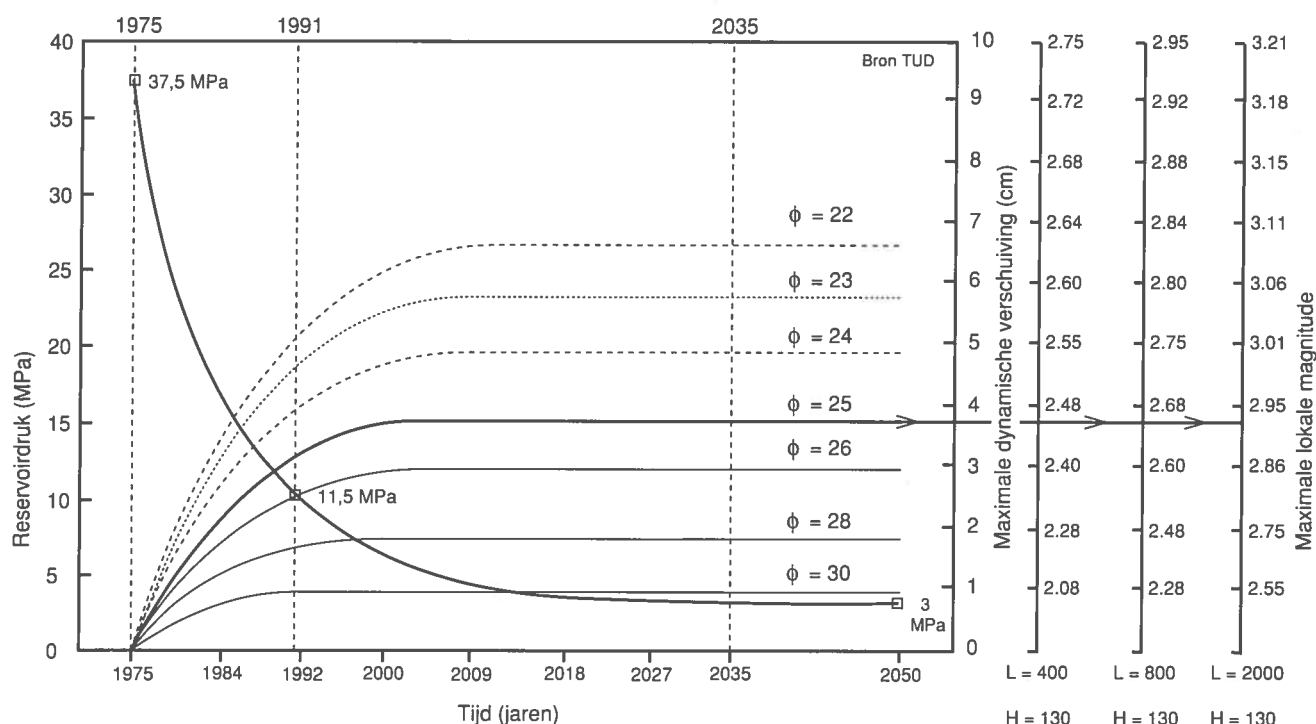
Met de maximale dynamische verschuiving kan bij een aangenomen segmentlengte L in langsrichting van de breuk

Figuur 29: Verticale verplaatsingen en verschuivingen einde productie. Langs de breuklijn is de mate van verschuiving weergegeven.



Figuur 30: Horizontale spanningen en verschuivingen langs breuk F1.





Figuur 31: Relatie gasdrukval en maximale dynamische effecten op breuk F2 in het gasreservoir Eleveld.

en de berekende hoogte H van het bewegingsoppervlak de bijbehorende magnitude volgens de schaal van Richter worden bepaald, uitgaande van de formule van Hanks-Kanamori (zie hoofdstuk 4). Voor segmentlengten L van 400 m, 800 m en 2000 m zijn de corresponderende magnitudes in figuur 31 opgenomen. De aldus berekende magnitudes hebben betrekking op de compactie. Triggering van aardbevingen door lokale tektonische restspanningen is buiten beschouwing gelaten, hetgeen verantwoord lijkt omdat deze restspanningen in het beschouwde gebied klein zijn, zie hoofdstuk 3.

De berekeningen geven een indicatie van de maximale magnitude die kan optreden bij een aardbeving langs een breuk, in of aan de rand van het Eleveld reservoir. De compactie door gaswinning is hier de drijvende kracht. De extra drukverlaging die wordt verwacht tussen 1992 en 2035 levert een zeer geringe bijdrage aan deze maximaal mogelijke magnitude. Uitspraken over werkelijke toekomstige aardbevingen zijn echter in zekere zin speculatief wegens de onbekendheid met de werkelijke situatie, zoals vorm, ruwheid en vervormingsgedrag van de breuk. Ook kan het zijn dat door kruip de breuk inmiddels deels is ontspannen. Er zijn immers bij het gasreservoir Eleveld al een aantal aardschokken waargenomen nadat er sprake was van aanzienlijke gasdrukval. De gemeten magnitudes zijn in de orde van 1,6 en 2,8. Deze waarden komen overeen met de berekeningen. Op basis van de numerieke

modelberekeningen kan gesteld worden dat de maximale magnitude van een door gaswinning geïnduceerde beving in het reservoir Eleveld of in de directe omgeving ervan in de toekomst niet meer zal bedragen dan circa 3 op de schaal van Richter.

7.5 Effect van gaswinning in de wijde omgeving van het reservoir

Om een verklaring te vinden voor de aardbevingen, die wat verder weg van de producerende gasvelden zijn opgetreden, zijn modelberekeningen uitgevoerd, waarbij parameterwaarden zijn gevarieerd om de relevantie ervan te toetsen aan de hand van de beschikbare metingen en observaties. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de doorsnede volgens het oost-west profiel weergegeven in figuur 23. De materiaaleigenschappen zijn gekozen in overeenstemming met de waarden in tabel 2 van hoofdstuk 6.

Er werden statische berekeningen uitgevoerd. De aandacht ging vooral uit naar het breukgedrag in zone B (figuur 23), waarvan wordt verwacht dat dit relatief gevoelig is voor spanningsveranderingen, omdat de opstuwende zoutrug, die waarschijnlijk de oorzaak is van de breukzone, daar relatief kleine horizontale spanningen teweegbrengt. De breukzone B ligt relatief ver van het reservoir, dat wil zeggen, buiten de gebruikelijke invloedszone (zie figuur 12).

Het mechanisch gedrag van de zoutformatie is in principe tijdsafhankelijk. Voor spanningsveranderingen van korte duur kunnen er schuifspanningen worden overgebracht, maar na een langere periode verdwijnen die tenslotte. Er zijn twee statische berekeningen uitgevoerd waarbij voor de lange termijn werd uitgegaan van "plastisch" zout en voor de korte termijn van "sterk" zout. Plastisch zout heeft betrekking op de initiële situatie. Sterk zout, of een gedrag tussen sterk en plastisch in, heeft betrekking op het additionele effect door gaswinning. Voor het zoutgedrag zijn de volgende materiaaleigenschappen aangehouden:

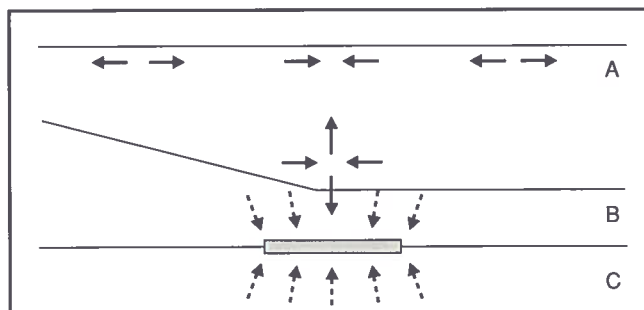
"plastisch" zout	cohesie	$c = 0,5 \text{ MPa}$
	wrijvingshoek	$\phi = 0^\circ$
"sterk" zout	cohesie	$c = 5,0 \text{ MPa}$
	wrijvingshoek	$\phi = 30^\circ$

Om na te gaan of visceus zoutgedrag relevant is voor de gaswinningsperiode, is ook een numerieke tijdsafhankelijke analyse uitgevoerd. De essentiële parameter is de viscositeit. Helaas is over de waarde weinig bekend; ergens tussen de 10^{16} en 10^{18} Ns/m^2 . De waarde is van belang aangezien het de periode van de spanningsrelaxatie bepaalt, de tijdsduur waarover de schuifspanningen verdwijnen.

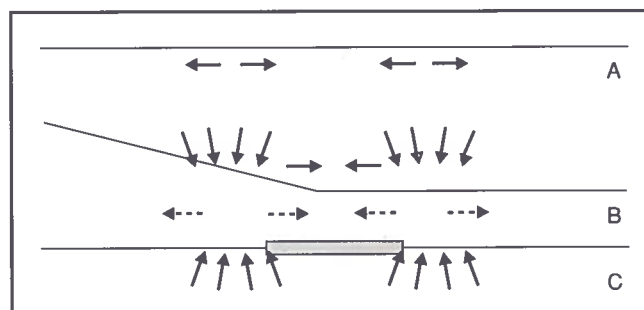
In figuur 32 zijn de resultaten van het visceuze zoutgedrag weergegeven. De aangegeven structuur bestaat uit drie zones: A het bovenmassief, B de zoutformatie en C het ondermassief. Het gearceerde gebied is het gasreservoir, waarin de tijdsafhankelijke gasdrukverlaging wordt aangebracht. De directe reactie toont een verticale spanningsafname boven het reservoir. Vervolgens gaat het zout toestromen en ontstaan er steunpunten waarop het bovenmassief rust. Tevens ontstaan er spanningsveranderingen in het bovenmassief. Mettertijd lopen de steunpunten weg door plastische deformaties in het zout. Tenslotte verdwijnen de geïnduceerde spanningen in het bovenmassief. De periode waarover dit hele proces plaats vindt blijkt ergens tussen de 100 en 10000 jaar te liggen.

Deze analyse laat zien dat het zoutgedrag voor een winningsperiode van 50 jaar als sterk zout mag worden beschouwd. Bovendien blijkt dat het zoutgedrag ervoor zorgt dat het effect van compactie door de gaswinning mettertijd over een breed gebied wordt verspreid, buiten het traditionele invloedsgebied. In de tijd gezien kan deze beïnvloeding zich uitstrekken tot ver over de periode van de gaswinning zelf. Geïnduceerde spanningen in het bovenmassief kunnen in het geval van Eleveld op den duur de breukzone B bereiken. Met de spreiding neemt de intensiteit ervan af. Omdat het proces langzaam verloopt, afhankelijk van de viscositeit, is het aannemelijk dat eventuele slip in de breukzone niet dynamisch maar aseïsmisch verloopt.

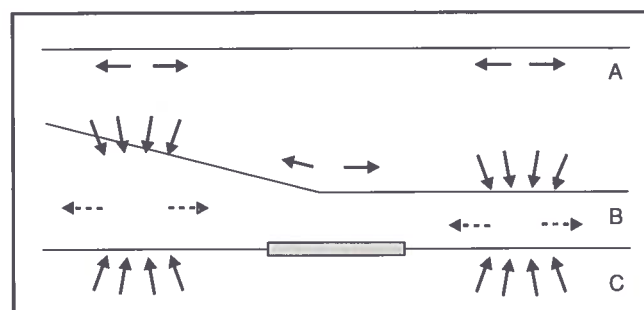
---> Beweging
-> Spanning



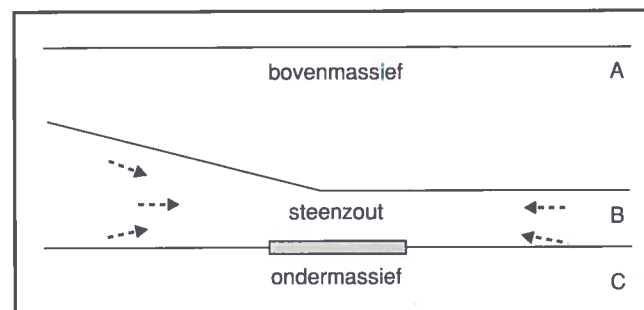
Direkte reactie



Eerste fase



Tweede fase

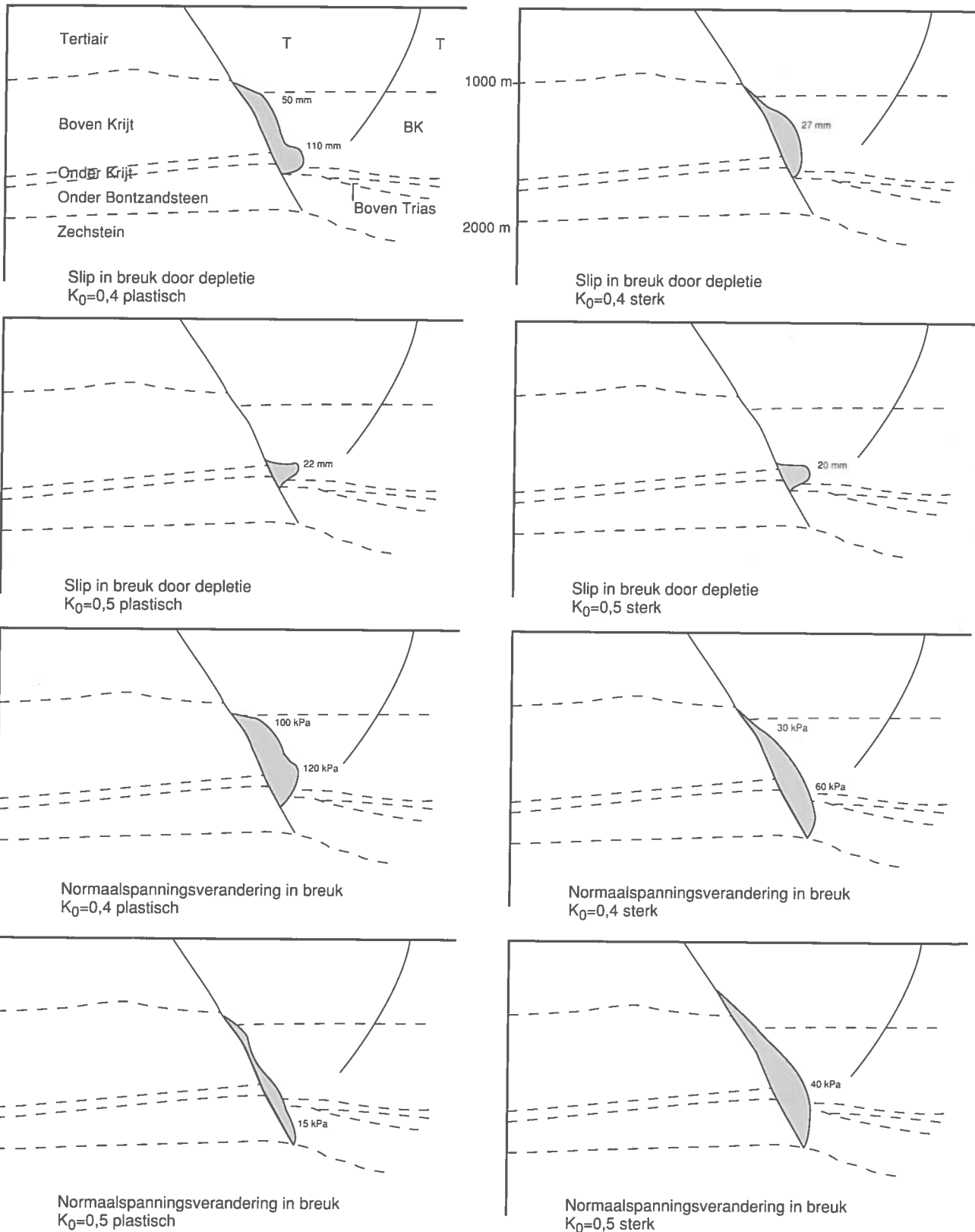


Eindfase

Bron GD

Figuur 32: Mechanisch gedrag van de zoutformatie als gevolg van gaswinning.

Figuur 33: Berekende verdeling van de spanningsafname en de verschuiving in de westelijke breukzone



Ook de initiële spanningssituatie heeft een belangrijke invloed op de mogelijke gevolgen door de gaswinning. Dit is in rekening gebracht via de globale spanningsverhouding K_0 . Is die laag, dan zijn er relatief lage horizontale spanningen en dan is de schuifsterkte in (verticale) breuken overeenkomstig laag. De realistische waarde voor K_0 ligt voor het Eleveld gebied tussen de 0,4 en 0,5.

De waarden in tabel 3 geven de maximale slip die lokaal langs de breuk in zone B is berekend, de optredende maximale spanningsafname $\Delta\sigma$ ter plaatse gemeten loodrecht op de breuk, en de zone van de breuk waarover daadwerkelijk verschuiving optreedt. Dit deel blijkt kleiner dan 45% van de gemodelleerde breuklengte. Voor de beschouwde situatie is het niet aannemelijk dat de breuk zich uitbreidt of dat er nieuwe breukvorming plaats vindt. De verschuiving manifesteert zich niet als een differentiële zetting aan de bovengrond.

In figuur 33 is de verdeling van de spanningsafname en de verschuiving langs het breukvlak aangegeven voor de berekeningen 1 tot 4 van tabel 3. Berekening 5 vertoont nagenoeg dezelfde resultaten als 2. Voor de kwalitatieve tijdsafhankelijke berekening "tijd", waarbij het zoutgedrag van "sterk" naar "plastisch" verloopt, stelt de slip de maximale verschuiving voor die boven de zoutrug optreedt bij passage van het drukpunt. Deze passage doet zich voor ergens tussen de 10 en 1000 jaar na de start van de gaswinning. De onzekerheid in de tijd hangt samen met de onzekerheid in de waarde van de viscositeit.

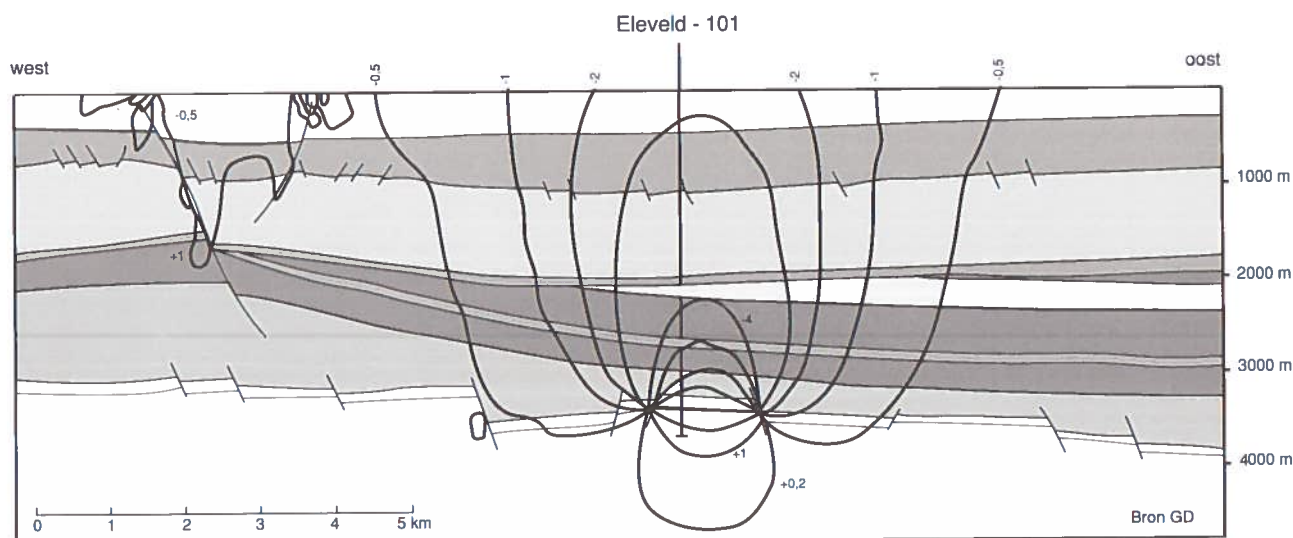
Nr	Initieel	Gaswinning		Westelijke Breukzone		
	K_0	zoutgedrag	reservoir E (GPa)	slip (cm)	$\Delta\sigma$ (kPa)	zone %
1	0,4	plastisch	27,5	11,0	120	45
2	0,4	sterk	27,5	2,7	60	45
3	0,5	plastisch	27,5	2,2	15	13
4	0,5	sterk	27,5	2,0	40	12
5	0,4	sterk	15,0	3,0	60	45
tijd		verlopend	23,0	3,5	50	-

Tabel 3

De meest aannemelijke situatie wordt weergegeven door berekeningen 2 en 4 in tabel 3, waarbij de effecten door gaswinning via sterk zoutgedrag worden overgebracht. Het plastisch zoutgedrag ontstaat na een relatief lange periode en de effecten ervan komen niet abrupt tot stand. Dit is wel het geval voor het sterk zoutgedrag.

Uit de statische berekeningen 2 en 4 blijkt zich bij "sterk" zout direct een spanningssituatie in te stellen waarbij horizontale spanningsafname en verschuiving in de westelijke breukzone optreden. Ter illustratie zijn in figuur 34 de maximale verticale verplaatsingen tengevolge van de gaswinning (berekening 2) weergegeven.

Figuur 34: Verdeling van de maximale verticale verplaatsingen in centimeters ten gevolge van de gaswinning volgens berekening 2 (tabel 3)



Gesteld wordt dat met de gevolgde procedure de berekende meest waarschijnlijke slip ook de maximaal denkbare is, aangezien er is uitgegaan van een initiele spanningssituatie, die kritisch is in de westelijke breukzone door de aanwezigheid van de zoutrug. Er is geen rekening gehouden met kruip. Bovendien is uitgegaan van ongunstige waarden, daar waar sprake is van onzekerheid in de materiaaleigenschappen. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een tweedimensionale geometrie. De werkelijkheid is driedimensionaal. De berekende verschuivingen zijn daarom enigszins overschat. Tenslotte is het reëel om niet alle slip dynamisch in rekening te brengen.

Met de gevonden berekeningsresultaten kan de maximaal mogelijke bevingsenergie worden vastgesteld. Uitgaande van de formule volgens Hanks - Kanamori (zie hoofdstuk 4) met een glijdingsmodulus variërend tussen 5 en 10 GPa, met een schuifoppervlak tussen de 50.000 en 150.000 m² en een maximale dynamische slip tussen 1 en 2 cm, heeft de magnitude van een mogelijke aardbeving een waarde tussen de 2,2 en 2,9 op de schaal van Richter. Deze waarden komen overeen met geconstateerde aardbevingen te Assen en Hooghalen, die in de buurt van het gasveld zijn waargenomen, zie tabel 1.

8 Analyse en interpretatie van aardbevingen in Noord-Nederland

8.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is de relatie tussen gaswinning en aardbevingen belicht uit het gezichtspunt van een specifieke discipline: seismologie, geologie en geomechanica. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het totale beeld, waarbij de inzichten van de verschillende disciplines worden gecombineerd.

8.2 Geofysische methoden

In veel exacte takken van wetenschap zoals natuurkunde en scheikunde kunnen relaties tussen optredende gebeurtenissen of tussen grootheden met zeer grote zekerheid worden aangetoond. Dit geldt speciaal onder laboratorium-omstandigheden waar een bepaald experiment herhaald kan worden en waarbij een systematische variatie aangebracht kan worden in de randvoorwaarden of de experimentele parameters. In de geofysica ontbreken deze mogelijkheden veelal, en daarmee wordt het dus lastiger een waterdichte bewijsvoering te construeren. In veel geofysische problemen ontbreekt een herhaling van het "experiment" en kan niet anders worden volstaan dan met een opsomming van omstandigheden, feiten en waarnemingen, die een bepaalde relatie bevestigen of juist ontkennen. Dit type bewijsvoering, een opsomming van feiten en waarnemingen is dus wezenlijk zwakker dan het natuurkundig bewijs.

In dit verband vervullen de geomechanische modelberekeningen een speciale rol: immers deze berekeningen met modellen van de aarde laten wel variaties toe van parameters en zijn wel te herhalen en dus plaatsen ze daarmee een model van de aardkorst als het ware in het laboratorium. Het probleem blijft natuurlijk hoe realistisch deze modellen zijn.

Wanneer een statistische benadering wordt gevolgd, zoals ook in de geofysica vaak noodzakelijk is, zijn er problemen van vergelijkbare aard. Met statistische methoden kunnen een aantal gebeurtenissen op een gemiddelde wijze nader gekarakteriseerd worden (mits het aantal voldoende groot is), maar uitspraken over een individuele gebeurtenis zijn niet mogelijk, tenzij in termen van de bepaalde kansverdeling. Het beste wat onder de gegeven omstandigheden bij veel geofysische problemen mogelijk is, zijn uitspraken waarbij een relatie aannemelijk gemaakt is of waar een waarschijnlijkheid aangegeven wordt.

Deze opmerkingen zijn vooral als verantwoording bedoeld voor de detaillistische beschrijvingen in de vorige hoofdstukken en geven een verklaring waarom de conclusies van dit rapport voorzichtig geformuleerd zijn.

8.3 De Noordnederlandse aardbevingen

Wanneer het geheel van de aardbevingen in Noord-Nederland in ogenschouw genomen wordt, zijn een aantal conclusies te trekken:

- Alle bevingen doen zich voor in of in de nabijheid van gasvelden, t.w. Eleveld, Middelie, Emmen/Roswinkel, Groningen veld, Norg.
- Het begin van de aardbevingsserie in een aseismisch gebied doet zich voor vanaf 1986, dus ca. 20 jaar na het begin van de gaswinning.
- Hoewel in geologische zin Noord-Nederland een eenheid vormt, zijn er aanzienlijke variaties met betrekking tot de structurele en lithologische opbouw van de diepe ondergrond.
- Het grootschalige tektonische spanningsveld in Noord-Nederland vormt een geringe bijdrage tot het totale spanningsveld in de ondergrond. Het totale veld wordt in hoofdzaak gevormd door de massa van het bovenliggend gesteente. Dit is een bevestiging van de conclusie dat Noord-Nederland als aseismisch wordt beschouwd. Lokaal kan het spanningsveld wel afwijkingen vertonen ten opzichte van het algemene beeld, bijvoorbeeld in de directe omgeving van zoutkoepels. Deze spanningsvelden in combinatie met de mechanische eigenschappen van de ondergrond ter plaatse zijn niet van dusdanige aard dat dit tot enige waarneembare seismiteit aanleiding heeft gegeven.

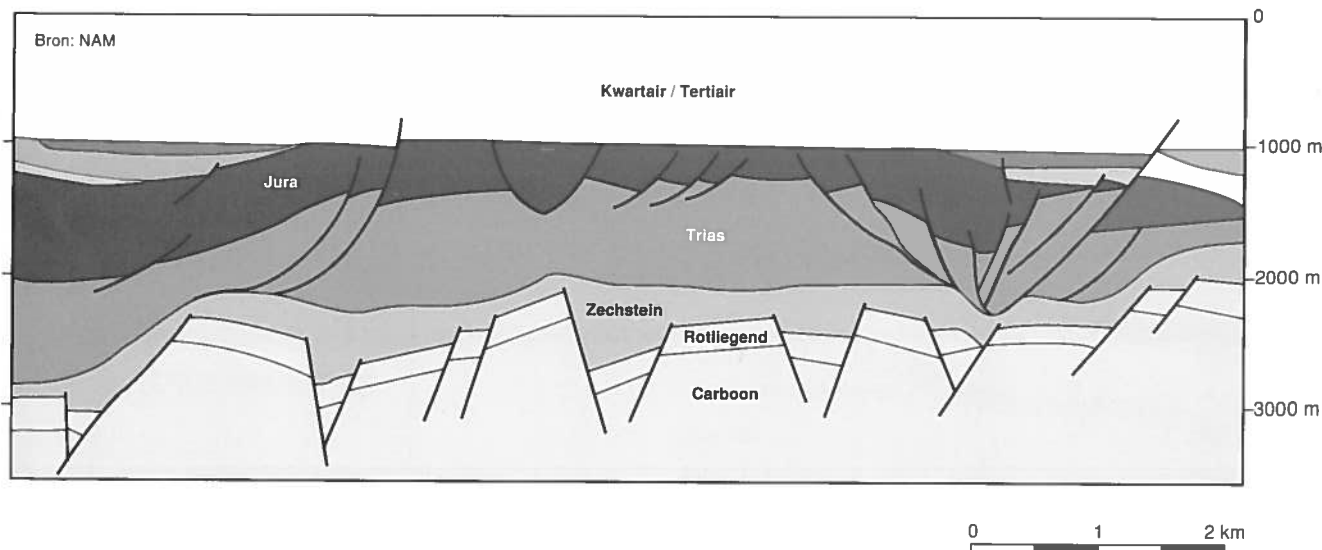
- Door modelberekeningen, zelfs aan sterk vereenvoudigde modellen van de ondergrond, kan worden aangetoond dat vooral in kleine velden gedurende de periode van gasonttrekking een kritisch spanningsveld opgebouwd kan worden. Dit wil zeggen een spanningsveld waarvan de normaalspanningen in verschillende richtingen zo sterk uiteenlopen dat de schuifspanningen de kritische grens voor verschuivingen langs breuken bereiken.
- Doordat als gevolg van gaswinning de spanningsherverdeling in de ruimte alleen over een beperkt gebied significant is, vooral in vergelijking met de spanningsherverdeling door grootschalige tektonische processen, zijn de resulterende aardbevingen kleiner dan magnitude 3,3.

Op grond van het bovenstaande is in algemene zin een relatie tussen gaswinning en het optreden van lichte aardbevingen aannemelijk gemaakt voor Noord-Nederland. Ervaring in het buitenland, bijv. Frankrijk, Canada, Duitsland, ondersteunt deze algemene conclusie. Hiermee is ook duidelijk dat voor geen enkel veld het optreden van aardbevingen als gevolg van de gasextractie op voorhand kan worden uitgesloten.

ZW

figuur 35: geologische situatie bij Middelie.

NO



8.4 Analyse van individuele aardbevingen in Noord-Nederland

De lijst met 24 bevingen laat zich verdelen in verschillende groepen:

- Assen, Hooghalen en Purmerend
- Emmen, Roswinkel
- Eleveld
- Groningenveld
- Langelo.

De bevingen bij Assen, Hooghalen en Purmerend vormen een groep omdat deze bevingen zich buiten gasvelden hebben voorgedaan op een geringere diepte dan het reservoir. Weliswaar vormen deze bevingen de aanleiding tot deze studie maar de relatie tot de gaswinning is het minst duidelijk. Met name de beving van Purmerend laat ook een tektonische verklaring toe, gezien de ligging van de seismisch actieve zone in Nederland van Limburg door Brabant naar Utrecht. Pas in de Noordzee wordt weer enige seismische activiteit waargenomen. De achtergronden zijn vooralsnog niet duidelijk.

Van een relatie met gaswinning kan alleen sprake zijn als dit verloopt via het "triggereffect" waarbij de energie van de beving wordt ontleend aan tektonische spanningen en waarbij de spanningsverandering ten gevolge van gaswinning de aanleiding is tot de beving; de druppel die de emmer doet overlopen. Dit is gemodelleerd voor een spanningssituatie bij een breuk op ca. 10 km van een gasveld,

waarbij zoutgedrag belangrijk is.

Figuur 35 geeft in een doorsnede een overzicht van de geologische situatie van het veld Middelie gelegen bij Purmerend.

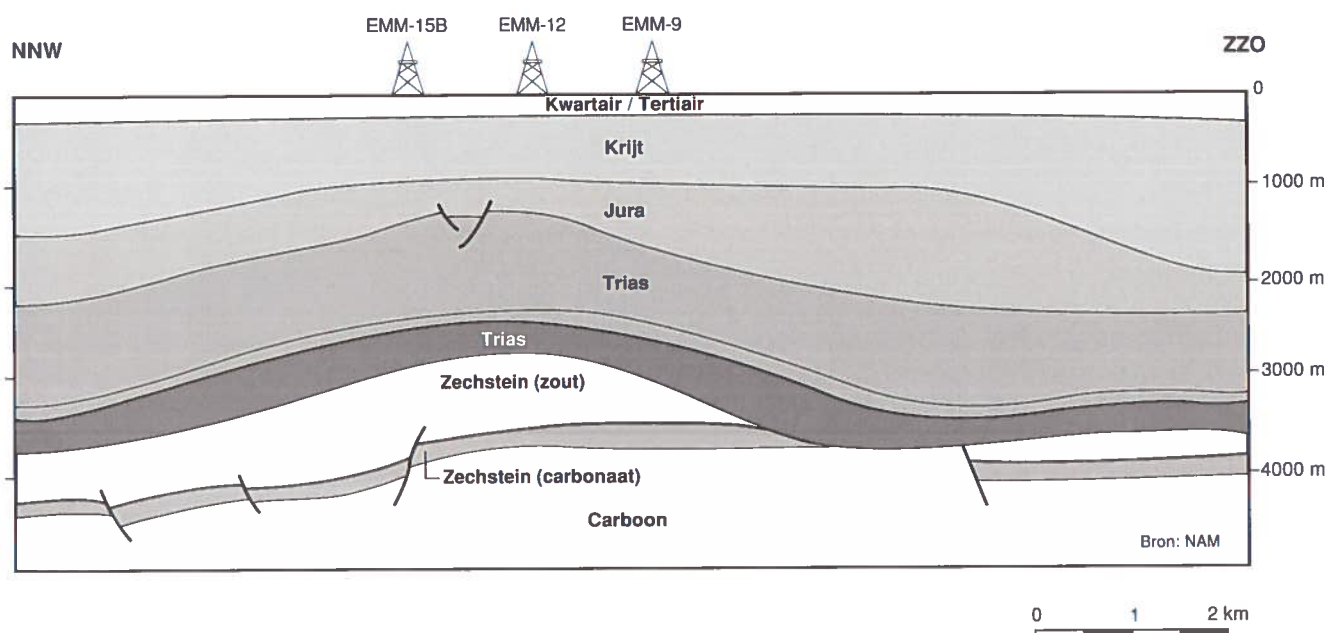
De aardbevingen bij Emmen en Roswinkel vormen een groep in Zuid-Drenthe. Hoewel de afstand tussen de epicentra van de bevingen in Emmen en bij Roswinkel slechts een tiental kilometers bedraagt, betreft het hier wel twee onderscheiden gasvelden op verschillende dieptes. De details zijn af te lezen in figuur 36.

Evenals de voorgaande bevingen zijn er van de aardbevingen in het Emmen en het Roswinkel veld onvoldoende gegevens voorhanden om tot verdergaande conclusies te komen dan besproken in het algemene deel van dit hoofdstuk.

De Eleveld bevingen zijn met de grootst mogelijke detaillering onderzocht. Voor de aardbevingen in Eleveld is aannemelijk gemaakt dat deze bevingen hun oorsprong vinden in de spanningshervestelling door het proces van gaswinning. Aan de top van het reservoir is conglomeraat gesteente aanwezig hetgeen seismische slip waarschijnlijk maakt. De verschuiving langs de breuk F2 (figuur 28) zoals die met modelberekeningen is gevonden, wordt bevestigd door seismologische waarnemingen.

Deze conclusies zijn eerder in het tussenrapport van de commissie gepubliceerd.

figuur 36: Gasvelden Emmen en omgeving.



Uit de slip zoals berekend uit de modellen volgt een maximale magnitude. De waarde voor deze magnitude is ca. 3 op de schaal van Richter en is daarmee in opmerkelijke overeenstemming met de waarden voor Noord-Nederland als geheel berekend met seismische methoden.

De opgetreden aardbevingen in het gasveld Eleveld hebben duidelijk gemaakt dat voldoende en nauwkeurige waarnemingen van doorslaggevend belang zijn voor een goede interpretatie.

Op dit gegeven is een groot deel van de conclusies en aanbevelingen van dit rapport gebaseerd.

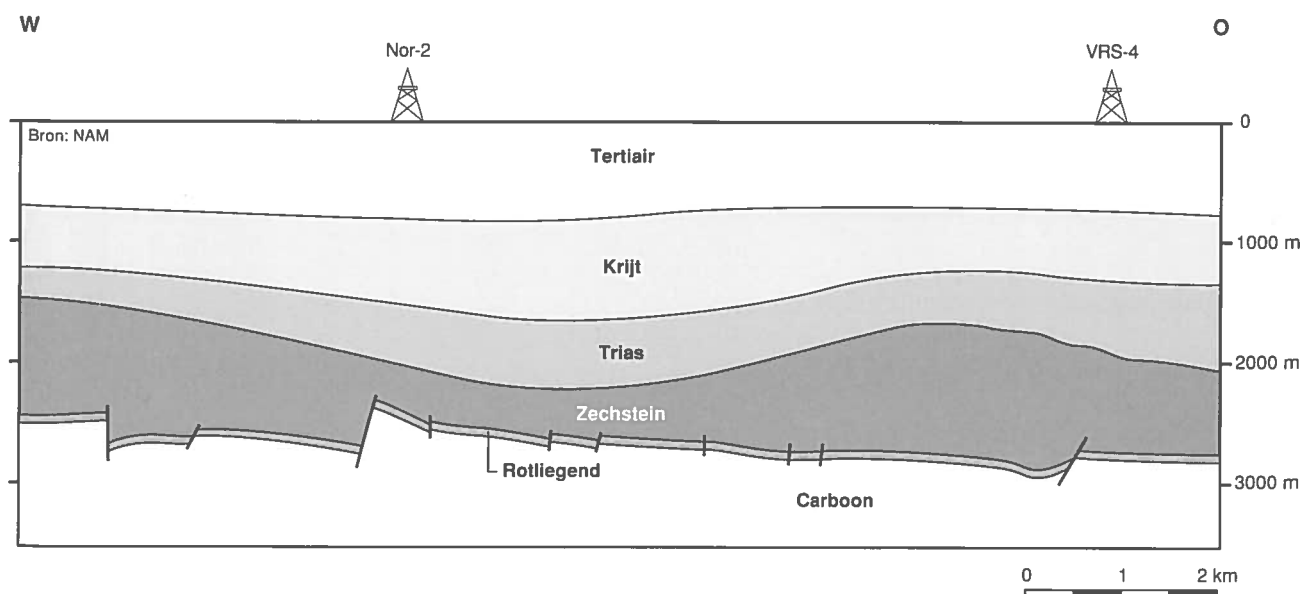
Met name door het boorgatseismometer experiment in Finsterwolde is een relatief groot aantal aardbevingen met kleine magnitudes in het Groningen veld geregistreerd. De aardbeving bij Middelstum op 5 december 1991 vormt het begin van de serie. Deze aardbevingen zijn vrijwel geheel in de tweede helft van de studie gedetecteerd door slechts één station. De late ontdekking van deze schokken maakt dat de situatie in het Groningen veld relatief onderbelicht is in deze studie. Tot nu toe werd aangenomen dat de door gaswinning geïnduceerde aardbevingen voornamelijk zouden optreden in kleine velden of in de breukbegrensde randen van de grote velden. Deze veronderstelde wetmatigheid zal voor de bevingen in het centrale deel van het Groningen veld nader bekeken moeten worden. De geringe nauwkeurigheid van de epicentrumbepalingen van circa 2 km. en het ontbreken van enige diepte indicatie maakt identificatie met bestaande breuken vrijwel onmogelijk.

Wanneer de drukcommunicatie over permeabele breuken in het veld goed is, kunnen door relatief grote spronghoogtes van breuken in het centrale deel van het veld toch schuifspanningen opgebouwd worden, als gevolg van compactie, die voldoende zijn om kleine aardbevingen te veroorzaken. Gezien het aantal van 11 bevingen is een relatie met gaswinning zeer waarschijnlijk.

De aardbeving bij Langelo is opmerkelijk omdat deze beving met een kracht van slechts 1,8 op de schaal van Richter in een kleine straal om het epicentrum gevoeld werd. Het tijdstip waarop deze schok plaatsvond kan hiervoor een verklaring zijn. Het gasveld Norg vertoont grote gelijkenis in geologisch en geomechanisch opzicht met het Eleveld, zie figuur 37. Deze aardbeving is illustratief in die zin dat kleine verschuivingen in een gebied van enkele vierkante kilometers door het publiek worden opgemerkt, terwijl deze soms nauwelijks door seismometers geregistreerd worden. Bovendien speelt deze beving een rol in de discussies aangaande gasinjectie in de ondergrond.

Naar aanleiding van deze beving moet opgemerkt worden dat de opdracht van de commissie niet zover strekt dat ook onderwerpen als gasinjectie, knallen en chemische processen in de ondergrond onderzocht zijn. De laatste twee onderwerpen zijn weliswaar kort aan de orde geweest, maar zijn als onvoldoende verklaringen voor de relatie tussen gaswinning en aardbevingen van de hand gewezen. Dit geldt eveneens voor de hypothese dat waterinjecties van

figuur 37: Geologische situatie bij Norg.



formatiewater bij het optreden van aardbevingen in Noord-Nederland een rol zouden spelen.

Naast de bevingen in Noord-Nederland heeft het station te Finsterwolde een tweetal bevingen met een kracht van 2,2 en 2,6 op de schaal van Richter in Duitsland opgetekend. Ook in de zuidelijke Noordzee zijn recentelijk enige aardbevingen door Nederlandse stations waaronder Finsterwolde geregistreerd.

Samenvattend is het op grond van het bovenstaande duidelijk dat aardbevingen in de regio Noord-Nederland pas optreden wanneer voldaan is aan een aantal voorwaarden ten aanzien van het spanningsveld, de aanwezigheid van breuken, de materiaalsamenstelling en de geomechanische eigenschappen in de directe omgeving van de breuk.

Dit maakt het al of niet optreden van aardbevingen tot een complex probleem, waarbij een voorspelling vooraf niet mogelijk is, zelfs niet wanneer een beschrijving tot in detail van een specifieke situatie voorhanden is. Uiteindelijk heeft een meerderheid van de geëxploiteerde gasvelden niet of nog niet seismisch waarneembaar gereageerd, terwijl de condities in Noord-Nederland in grote lijnen toch dezelfde zijn. Zelfs in de reguliere seismologie van grootschalige tektonische bewegingen is aardbevingsvoorspelling m.b.t. sterkte, plaats en tijdstip tot nu toe weinig succesvol.

De methoden die in deze analyse aangaande de relatie gaswinning en aardbevingen gehanteerd zijn, vinden hun oorsprong in bekende en aanvaarde technieken.

Het is niet uit te sluiten, maar wel onwaarschijnlijk, dat op een termijn van ca. 10 jaar principieel nieuwe technieken ontwikkeld worden die de bovenstaande overwegingen in een nieuw daglicht zetten.

9 Conclusies en aanbeveling

9.1 Conclusies

Op grond van het multidisciplinaire onderzoek heeft de begeleidingscommissie de resultaten samengevat in een aantal conclusies.

- a In de periode december 1986 tot en met augustus 1993 werden in Noord-Nederland 24 kleine aardbevingen geregistreerd met magnitudes variërend van 1,4 tot 2,8 op de schaal van Richter. Het KNMI ontving van een twaalfstal aardbevingen meldingen uit het publiek. Deze groep van aardbevingen onderscheidt zich van andere bevingen in Nederland door de kleinere magnitude, de geringere haarddiepte en door het tijdsbestek waarin de aardbevingen zijn opgetreden.
- b In het geval van het gasveld Eleveld heeft gaswinning aanleiding gegeven tot geïnduceerde aardbevingen. Deze conclusie is getrokken op grond van seismische waarnemingen, modelberekeningen en geologische gesteldheid van de ondergrond.

Voor de bevingen bij Assen en Hooghalen is een relatie met gaswinning niet uit te sluiten. Via het complexe rheologische gedrag van zoutlagen in de ondergrond zijn deze bevingen mogelijk getriggerd.

Voor de andere aardbevingen is de relatie met gaswinning niet expliciet aangetoond; zij is alleen in algemene zin onderzocht. Gezien het seismische patroon, de ligging van de hypocentra, de relatie met historische seismiteit en de frequentie-magnitude verdeling zijn deze bevingen echter van niet-tektonische oorsprong en zijn derhalve mogelijk door gaswinning geïnduceerd.

Met betrekking tot de aardbeving bij Purmerend kan geen onderscheid gemaakt worden tussen een tektonisch of een getriggerd mechanisme omdat er onvoldoende gegevens voorhanden zijn.

- c Statistisch gezien is de maximaal te verwachten magnitude van aardbevingen in Noord-Nederland berekend op $M_L = 3,3$ op de schaal van Richter. De kans dat een dergelijke beving optreedt is verwaarloosbaar klein.

Uit de geomechanische modellering is ook een schatting gemaakt voor de maximaal te verwachten aardbeving. De waarde van 2,9 op de schaal van Richter is ondanks de totaal andere aanpak in goede overeenstemming met het resultaat uit de seismologie.

- d De uitkomsten van het multidisciplinaire onderzoek geven aan, dat als gevolg van de maximaal te verwachten aardbeving, zelfs in het ongunstigste geval, slechts een kleine kans bestaat op lichte schade aan bouwwerken in een beperkt gebied rond het epicentrum.
- e Met inschakeling van seismische observaties in boorgaten is een adequate seismische detectie mogelijk. De ervaring met het station Finsterwolde heeft aangetoond dat er technisch gezien geen beletselen zijn voor de aanleg van een netwerk van boorgatseismometers in Noord-Nederland.
- f Gezien de resultaten van het onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen komt de commissie tot de slotsom dat onder bepaalde omstandigheden aardbevingen het gevolg zijn van gaswinning. Het aantal aardbevingen en de sterkte ervan zijn in Noord-Nederland niet van dusdanige aard dat dit aanleiding hoeft te zijn tot enige verontrusting.

9.2 Aanbeveling

De commissie is van mening dat nader onderzoek pas tot verdergaande resultaten kan leiden wanneer substantieel meer gegevens over het ondergrondse spanningsveld en seismische registraties voor handen zijn. Met het oog hierop komt de commissie met de aanbeveling om voor Noord-Nederland een seismisch observatie-netwerk op te zetten. Dit netwerk zal goed in staat moeten zijn de eventuele aardbevingen te detecteren, te lokaliseren en te kwantificeren.

10 Referenties

10.1 Literatuurverwijzingen

Brune J.N., 1970 Tectonic stresses and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J.Geophys.Res., vol.75, pp.4997-5009.

Deutsche norm DIN 4149, teil 1, April 1881 Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 14 Seiten.

Deutsche norm DIN 4150, teil 3, Mai 1986 Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 6 Seiten.

Grünthal G. (ed.), 1993 European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-scale). Published in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol.7, pp.79, Luxembourg.

Houtgast G., 1987 The reliability of some weak historical earthquakes in The Netherlands, KNMI memorandum GO-87-07.

Houtgast G., 1991 Catalogus van aardbevingen in Nederland, KNMI publicatie 179, pp.166 .

Makropoulos K.C., P.W. Burton, 1983 Seismic risk of Circum-Pacific Earthquakes, I. Strain energy release. PAGEOPH., vol.121, no.2, pp.247-267.

Spiers C.J., C.J. Peach, J.L. Liezenberg, 1989 A thermo-Mechanical Data base for Rocktypes expected in an around Permian evaporite bodies in The Netherlands. Inst. Earth Sciences, University Utrecht.

Volant P. et al., 1992 b-Value, aseismic deformation and brittle failure within an isolated geological object: Evidences from a dome structure loaded by fluid extraction. Geophysical research letters, vol.19, no.11, pp.1149-1152.

10.2 Rapporten

Barends F.B.J., J.T. van der Poel, J.A.M. Teunissen, 1992 Simulatie deformatie omgeving Eleveld reservoir ten gevolge van gaswinning. Bijdrage Grondmechanica Delft aan het multidisciplinair onderzoek, CO-323880/28, Delft, juni 1992.

Haak H.W., T. de Crook, 1993 Seismische analyse van aardbevingen in Noord-Nederland. Bijdrage KNMI aan het multidisciplinair onderzoek, De Bilt, december 1993.

Roest J.P.A., W. Kuilman, 1993 Geomechanische analyse van de lichte aardshokken in het Eleveld reservoir. Bijdrage TU-Delft aan het multidisciplinair onderzoek, Delft, september 1993.

Rondeel H.E., J.S.L. Everaars, 1993 Spanning in Noordoost-Nederland: een breakout-analyse. Bijdrage VU aan het multidisciplinair onderzoek, Amsterdam, oktober 1993.

10.3 Selectie geraadpleegde literatuur

Ahmad Moid U., A. Smith Jeffrey, 1988 Earthquakes, injection wells, and the Perry Nuclear Power Plant, Cleveland, Ohio. *Geology*, vol.16, pp.739-742, August 1988.

Aswegen G. van, 1990 Fault stability in SA gold mines. Paper read at the International Conference on Mechanics of jointed and faulted rock, Technical University of Vienna, Austria.

Bluemling P., K. Fuchs, T. Schneider, 1983 Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. *Phys. Earth and Planet. Interiors* 33, pp.250-254.

Boehmer M., H.-P. Harjes, V. Weber, M. Will, 1989 Seismologische Untersuchungen von Erderschütterungen im Ruhrgebiet. *Das Markscheidewesen* 96 (1989) Nr.2.

Bonjer K.-P., C. Gelbke, B. Gilg, D. Rouland, D. Mayer-Rosa, B. Massinon, 1984 Seismicity and dynamics of the Upper Rhinegraben. *J. Geophysics* (1984), 55: 1-12.

Brummer R.K., A.J. Rorke, 1990 Case studies on large rockbursts in South African gold mines. *Rockbursts and seismicity in mines*, Fairhurst (ed.). Balkema, Rotterdam.

Doser D.I., M.R. Baker, D.B. Mason, 1991 Seismicity in the Warwink gas field, Delaware basin, west Texas, and its relationship to petroleum production. *Bull.Seism.Soc.Am.*, vol.81, pp.971-986.

Draxler J.K., D.P. Edwards, 1984 Formation evaluation in the Carboniferous of Northern Europe. Schlumberger.

Feignier B., J.R. Grasso, 1990 Seismicity Induced by Gas Production: I. Correlation of Focal Mechanisms and Dome Structure. *PAGEOPH.*, vol.134, no.3. Birkhäuser Verlag, Basel.

Feignier B., J.R. Grasso, 1990 Seismicity Induced by Gas Production: II. Lithology Correlated Events, Induced Stresses and Deformation. *PAGEOPH.*, vol.134, no.3. Birkhäuser Verlag, Basel.

Fischer Joseph A., 1989 Natural and Induced Seismicity in Ohio. Proceedings of the fourth international conference on soil dynamics and earthquake engineering, Mexico City, Mexico, October 1989.

Geertsma J., 1973, A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case. *Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, vol. 28, pp. 43-62.

Geertsma J., G. van Opstal, 1973 A numerical technique for predicting subsidence above compacting reservoirs, based on the nucleus of strain concept. *Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, vol.28, pp.63-78.

Grasso J.R., 1991 Fluid-induced instabilities of the upper crust: consequences on seismic hazard assesment in the neighbouring of hydrocarbon extraction. Communication presented to Inter. Conf. on Earthq. Prediction, Council of Europe, Strasbourg, France, October 15-18, 1991.

Grasso J.R., B. Feignier, 1990 Geomechanical behaviour and structural evolution induced by a depletion. A case study of a gas field. *Rockbursts and Seismicity in Mines*, Fairhurst(ed.). Balkema, Rotterdam.

Grasso J.R., Ph. Volant, D. Fourmaintraux, V. Maury, 1991 Relation between hydrocarbon extraction, local triggered earthquakes and major regional earthquakes: Example of the Pyrenean area. Symposium of rock mechanics, Norman (Oklahoma).

Grasso J.R., G. Wittlinger, 1990 Ten years of seismic monitoring over a gas field. *Bull.Seism.Soc.Am.*, vol.80, No.2, pp.450-473.

Kooi H., S. Cloetingh, G. Remmelts, 1989 Intraplate stresses and the stratigraphic evolution of the North Sea Central Graben. *Geol. & Mijnbouw* 68, pp.49-72.

Kovach Robert L., 1974 Source Mechanisms for Wilmington Oil Field, California, Subsidence Earthquakes. *Bull.Seism.Soc.Am.*, vol.64, no.3, pp.699-711.

Leydecker G., 1991 The seismological surveillance of Gorleben site and its surroundings. Proceedings of NEA workshop on Long-term Observation of the Geological Environment (Helsinki, 9-11 Sept. 1991) Nuclear Energy Agency/Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Lorig L.J., B.E. Hobbs, 1990 Numerical Modelling of Slip Instability Using the Distinct Element Method with State Variable Friction Laws. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.*, vol.27, No.6, pp.525-534.

Maury V., J.R. Grasso, U. Domaine, I.P.G. Wittlinger, 1990 Lacq Gas Field (France): Monitoring of Induced Subsidence and Seismicity Consequences on Gas Production and Field Operation. Society of Petroleum Engineers SPE20887. Paper presented at Europec 90, The Hague, Netherlands, 22-24 Oct. 1990.

- McGarr A., 1991 On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production. *Bull.Seism.Soc.Am.*, vol.81, No.3, pp.948-970.
- Mehrhoff S., 1990 Bergbaubedingte Erdschütterungen im Ruhrgebiet. *Das Markscheidewesen* 97(1), pp.383-387.
- Nicholson C., E. Roeloffs, R.L. Wesson, 1988 The northeastern Ohio earthquake of 31 january 1986: was it induced? *Bul.Seism.Soc.Am.*, vol. 78, no.1, pp.188-217.
- Nicholson C., R.L. Wesson, 1990 Earthquake Hazard Associated With Deep Well Injection - A Report to the U.S. Environmental Protection Agency. U.S. Geological Survey Bulletin, nr.1951.
- Roest J.P.A., R.D. Hart, L.J. Lorig, 1990 Modelling fault-slip in underground mining with the distinct element method. *IAEG-6th Congress*, Amsterdam, augustus 1990.
- Segall P., 1989 Earthquakes triggered by fluid extraction. *Journal of Geology*, vol. 17, pp 942-946.
- Simpson D.W., 1986 Triggered Earthquakes. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 14, pp 21-42.
- Turbitt Terry, 1991 Seismic Activity and Seismic Hazard Monitoring (Terry Turbitt describes UK and global seismic monitoring activity undertaken by the Global Seismology Group of NERC's British Geological Survey). *NERC news*, April 1991.
- Wetmiller, R.J., 1986 Eartquakes near Rocky Mountain House, Alberta, and their relationship to gas production facilities, *Can. J. Earth Sci.*, vol. 23, pp 172-181.

11 Bijlagen

EZ

Instelling Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen

30 september 1991/nr. 91085238
Directie Wetgeving en andere
Juridische Aangelegenheden/W

De Minister van Economische Zaken, Handelende in overeenstemming met de Minister van Verkeer en Waterstaat; Overwegende, dat er onduidelijkheid bestaat over de oorzaak van enkele aardbevingen in Drenthe en Noord-Holland; dat er onder leiding van het KNMI een onderzoek wordt verricht naar de achtergrond van deze bevingen; dat het wenselijk is dit onderzoek te laten begeleiden door een commissie van deskundigen;

Besluit:

Artikel 1

In dit besluit wordt verstaan onder: ministers: de Minister van Economische Zaken en de Minister van Verkeer en Waterstaat; commissie: de in artikel 2 bedoelde commissie; onderzoek: het multidisciplinaire onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en bevingen, bedoeld in het antwoord van de regering op vragen van enkele leden van de Tweede Kamer, Aankhangsel nr. 597 van de Handelingen der Tweede Kamer, vergaderjaar 1990-1991.

Artikel 2

Er is een Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen.

Artikel 3

De commissie heeft tot taak:

- de onderscheiden deelprojecten binnen het onderzoek inhoudelijk te begeleiden onderling af te stemmen;
- de resultaten van het onderzoek te verwerken in een rapport, dat geschikt is voor openbaarmaking;
- aanbevelingen te doen aangaande het gebruik van seismometers, mede op grond van het experiment met boorgat-seismometers, dat in het kader van het onderzoek wordt uitgevoerd;
- aan de hand van de resultaten van het onderzoek te beoordelen of de geologische gesteldheid van de ondergrond in het noorden des lands zodanig is, dat onder bepaalde voorwaarden nieuwe bevingen verwacht kunnen worden en zo ja, in hoeverre deze bevingen gevolgen voor bouwwerken zouden kunnen hebben.

Artikel 4

- De voorzitter en de overige leden van de commissie worden benoemd en ontslagen door de Minister van Economische Zaken in overeenstemming met de Minister van Verkeer en Waterstaat.
- Ter gelegenheid van de instelling worden tot lid benoemd:
 - dr. A.R. Ritsema, tevens voorzitter;
 - H.J. Gussinklo, werkzaam bij de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.;
 - dr. H.W. Haak, werkzaam bij het KNMI;
 - drs. A. Lokhorst, werkzaam bij de Rijks Geologische Dienst;
 - ir. J.J.E. Pöttgens, werkzaam bij het Staatstoezicht op de Mijnen.
- De Minister van Economische Zaken voorziet in het secretariaat.

Artikel 5

Ter uitvoering van haar taak kan de commissie onder meer:

- daarvoor in aanmerking komende personen ter vergadering uitnodigen om hun mening uiteen te zetten of inlichtingen te verstrekken;
- zich rechtstreeks tot derden wenden tot het verkrijgen van de inlichtingen die zij behoeft.

Artikel 6

De commissie kan ter uitvoering van haar taak de ministers voorstellen nader onderzoek te doen uitvoeren.

Artikel 7

De commissie stelt haar eigen werkwijze vast.

Artikel 8

De commissie biedt het rapport, alsmede de aanbevelingen en conclusies, bedoeld in artikel 3, voor 1 november 1993 aan de ministers aan.

Artikel 9

Een ieder die betrokken is bij de werkzaamheden van de commissie en daarbij de beschikking krijgt over de gegevens waarvan hij het vertrouwelijk karakter kent of redelijkerwijs moet vermoeden, en voor wie niet reeds uit hoofde van ambt, beroep of wettelijk voorschrift ter zake van die gegevens een geheimhoudingsplicht geldt, is verplicht tot geheimhouding daarvan, behoudens voor zover enig wettelijk voorschrift

hem tot bekendmaking verplicht of uit zijn taak bij deze werkzaamheden de noodzaak tot bekendmaking voortvloeit.

Artikel 10

Het beheer van de bescheiden betreffende de werkzaamheden van de commissie geschiedt met inachtneming van de bepalingen van het Besluit Algemene secretarie-aangelegenheden rijksadministratie (Stb. 1980, 182) op overeenkomstige wijze als bij het Ministerie van Economische Zaken. De bescheiden worden na beëindiging van de werkzaamheden van de commissie opgeborgen in het archief van dat ministerie.

Artikel 11

- Dit besluit wordt bekendgemaakt in de Staatscourant.
- Het treedt in werking met ingang van de tweede dag na die van de dagtekening van de Staatscourant waarin het wordt geplaatst.
- Het vervalt met ingang van 1 januari 1994.

Afschrift van dit besluit zal worden gezonden aan de Algemene Rekenkamer.

's-Gravenhage, 30 september 1991
De Minister van Economische Zaken,
J.E. Andriessen.

Voortgangsrapportage multidisciplinair onderzoek

Deze voortgangsrapportage is een weergave van de eerste resultaten halverwege het multidisciplinaire onderzoek naar de mogelijke relatie tussen gaswinning en het optreden van aardbevingen in Noord-Nederland. Dit onderzoek werd begonnen op 8 oktober 1991 met de instelling van een Begeleidingscommissie. De opdrachtgevers van het onderzoek zijn de Ministers van Economische Zaken en Verkeer & Waterstaat. Het twee-jarige onderzoek zal vóór 1 november 1993 worden afgerond met een rapportage van de bereikte onderzoeksresultaten en conclusies. Daarnaast zal de Begeleidingscommissie aanbevelingen doen naar aanleiding van het onderzoek.

Bijgaande tabel geeft een overzicht van de aardbevingen in Noord-Nederland van 1986 tot en met augustus 1992. De magnitudes (kracht) van de bevingen lopen uiteen van 1,6 tot 2,8 op de schaal van Richter. In alle gevallen is de uitstraling van seismische energie in de vorm van trillingen in grootte orde 10.000 maal kleiner dan die van de Roermond-aardbeving van 13 april 1992. Alle schokken zijn waargenomen in gebieden waar ook gaswinning plaatsvindt. Van de sinds 1988 instrumenteel waargenomen aardbevingen in de tabel zijn vooral die bij Geelbroek en bij Eleveld goed door het seismometer netwerk rond Assen geregistreerd, zodat lokatie en diepte ervan nauwkeurig bepaald konden worden. Uit de seismogrammen kon worden vastgesteld dat deze 5 aardbevingen zich hebben voorgedaan door afschuiving langs een bestaande breuk op een diepte van ca. 3 km in het reservoir van het gasveld Eleveld.

Van de andere bevingen uit de tabel zijn de lokatie en de diepte minder nauwkeurig bekend. Het onderzoek richt zich mede daarom in de eerste plaats op het gasveld Eleveld zelf en de directe omgeving daarvan. Voor dit doel werd het veld en zijn omgeving gemodelleerd en werden gegevens van de geologische opbouw en de relevante gesteente-eigenschappen gebruikt. De effecten van de spanningsverandering ten gevolge van de gasonttrekking kunnen vervolgens berekend worden.

Op grond van de verzamelde gegevens en de tot nu toe uitgevoerde studies zijn de volgende resultaten naar voren gekomen:

- Uit het modelonderzoek blijkt, dat ten gevolge van gasonttrekking aan de diepe ondergrond (die leidt tot samendrukking van het gesteente in het reservoir) lokale verschuivingen langs bestaande breuken kunnen optreden.
- Deze verschuivingen kunnen zich manifesteren als een plotselinge beweging in de vorm van een lichte aardbeving, of in de vorm van een geleidelijke beweging. Dit is mede afhankelijk van het soort gesteente ter plaatse.
- De aardbevingen bij Geelbroek en Eleveld vonden plaats op het niveau van het gasreservoir.
- De seismisch waargenomen bewegingen vonden plaats langs bestaande breuken in dit reservoir.
- De aard van het reservoirgesteente van het gasveld Eleveld maakt een plotselinge beweging in de vorm van een aardbeving zeer wel mogelijk.

Op grond van deze resultaten komt de commissie tot de conclusie dat in de specifieke situatie van het veld Eleveld, gaswinning aanleiding heeft gegeven tot genoemde aardbevingen.

Voor de aardbevingen bij Assen in 1986 en Hooghalen in 1987, die waargenomen zijn in de directe omgeving van het gasveld Eleveld (op een geringere diepte dan het reservoir en buiten de begrenzing van het reservoir), is de conclusie minder duidelijk. Op grond van de eerste resultaten van het onderzoek naar spanningsveranderingen en bewegingen aan bestaande breuken buiten het veld is het evenwel niet uit te sluiten, dat deze bevingen door gasonttrekking teweeg zijn gebracht. Het onderzoek hiernaar wordt nog voortgezet.

Van de aardbevingen bij Purmerend, Emmen, Roswinkel en Middelstum is de oorzaak thans nog niet duidelijk.

In de eindrapportage zal het bovengeschetste uitvoeriger aan de orde komen. Bovendien zal worden ingegaan op de vraag, waarom juist deze accumulatie van seismische bewegingen in de laatste paar jaar heeft plaatsgevonden en wat de achtergrond is van de geografische spreiding ervan. Tevens zal worden ingegaan op de maximaal te verwachten seismische verstoring en de mogelijke effecten daarvan aan de oppervlakte, met inachtneming van de geologische omstandigheden in Noord-Nederland.

Naast de bovengenoemde onderzoeken is een studie gaande naar de omstandigheden waaronder een eventueel te plaatsen net van seismometers in Noord-Nederland optimaal kan functioneren. De resultaten hiervan zullen eveneens in de eindrapportage aan de orde komen.

Plaats	Epicentrum	Diepte	Intensiteit	Magnitude
Assen 26-12-86	6,548° OL 52,992° NB	1,0 ± 0,4 km	IV - V	2,8
Hooghalen 14-12-87	6,552° OL 52,928° NB	1,5 ± 0,4 km	IV	2,5
Purmerend 01-12-89	4,970° OL 52,529° NB	1,2 ± 0,4 km	V	2,7
Emmen 15-02-91	6,914° OL 52,771° NB	3,0 ± 2 km	III - IV	2,2
Geelbroek 25-04-91	6,574° OL 52,951° NB	3,0 ± 0,3 km	III - IV	2,6
Eleveld 08-08-91	6,569° OL 52,961° NB	3,5 ± 0,3 km	geen enquête	2,7
Middelstum 05-12-91	6,657° OL 53,358° NB	< 2 km	III	2,4
Geelbroek 23-05-92	6,572° OL 52,954° NB	3,1 ± 0,3 km	III - IV	2,6
Geelbroek 24-05-92	6,57° OL 52,95° NB	-	II	1,6
Roswinkel 11-06-92	7,035° OL 52,846° NB	1,5 ± 0,5 km	III - IV	2,5
Eleveld 22-07-92	6,58° OL 52,96° NB	3,6 ± 0,5 km	III	2,4

Lijst van participanten

dr. A.R. Ritsema, De Bilt, voorzitter
J.M. van Herk, EZ, Den Haag, secretaris
dr. H.W. Haak, KNMI, De Bilt, projectleider
H.J. Gussinklo, NAM, Assen
drs. A. Lokhorst, RGD, Haarlem
ir. J.J.E. Pöttgens, SodM, Rijswijk
ir. R.H. Camphuysen, Elf Petroland, Den Haag

ir. J.P.A. Roest, TUD, Delft
W. Kuilman, TUD, Delft
dr. H.W. Rondeel, VU, Amsterdam
mw. drs. J.S.L. Everaars, VU, Amsterdam
prof.dr.ir. F.B.J. Barends, Grondmechanica Delft, Delft
ir. J.T. van de Poel, Grondmechanica Delft, Delft
dr.ir. J.A.M. Teunissen, Grondmechanica Delft, Delft
ir. T. de Crook, KNMI, De Bilt
dr.ir. F.K. Lehner, Shell Research, Amsterdam
drs. E. Mobach, NAM, Assen
mw.drs. C.M. Steekelenburg, NAM, Assen
dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, SodM, Rijswijk
Y. Leroy, KSEPL, Rijswijk
drs. D. Doornhof, NAM, Assen
drs. Ph.J.M. Marchina, NAM, Assen
dr. D. Fourmaintraux, Elf Aquitaine, Pau (Fr.)

Colofon

Samenstelling

Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen

Tekstverwerking

mw. J.H.W.M. Vermeulen

Vormgeving

Studio KNMI

Lithografie

Z-Design, Amsterdam

Druk

Meerpaal Offset bv, Tiel

*Dit eindrapport en de samenvatting zijn op aanvraag beschikbaar
bij het KNMI afdeling Seismologie, Postbus 201, 3730 AE De Bilt.
Telefoon 030 - 206 911.*