

Rijks Geologische Dienst **RGD**

Toelichting bij kaartblad III Rottumeroog-Groningen

Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland

Toelichting bij blad III

Rottumeroog–Groningen

Voorwoord 5

1	Inleiding 7
1.1	Begrenzing van het studiegebied 7
1.2	Gegevensbestand 7
1.3	Delfstoffen 8
1.3a	Exploratie- en produktiegeschiedenis van het Groningen gasveld 8
1.3b	Zoutwinning 10
1.4	Opzet van het onderzoek 11
1.5	Kaarten en profielen 14
1.6	Toelichting 16
1.7	Samenvatting 16
1.7.1	Stratigrafische opeenvolging 16
1.7.2	Structurele eenheden 17
1.7.3	Geologische geschiedenis 19
2	Limburg Groep 20
2.1	Stratigrafie 20
2.2	Geul Subgroep 20
2.2.1	Epen Formatie 20
2.3	Caumer Subgroep 21
2.3.1	Baarlo Formatie 21
2.3.2	Ruurlo Formatie 23
2.3.3	Maurits Formatie 23
2.4	Dinkel Subgroep 23
2.4.1	Tubbergen Formatie 24
2.5	Hunze Subgroep 25
2.5.1	De Lutte Formatie 25
2.6	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie 25
3	Boven-Rotliegend Groep 27
3.1	Stratigrafie 27
3.1.1	Slochteren Formatie 27
3.1.2	Silverpit Formatie 30
3.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie 31
3.3	Petrofysische evaluatie 32
4	Zechstein Groep 38
4.1	Stratigrafie 38
4.1.1	Z1 (Werra) Formatie 38
4.1.2	Z2 (Stassfurt) Formatie 40
4.1.3	Z3 (Leine) Formatie 41
4.1.4	Z4 (Aller) Formatie 42
4.1.5	Z5 (Ohre) Formatie 42
4.1.6	Zechstein Boven-Kleistein Formatie 42
4.1.7	Zechstein Zout 43
4.1.8	Zechstein Caprock Formatie 43
4.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie 43

5	Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep	45
5.1	Stratigrafie	45
5.2	Onder-Germaanse Trias Groep	45
5.2.1	Stratigrafie	45
5.2.2	Onder-Bontzandsteen Formatie	46
5.2.3	Hoofd-Bontzandsteen Subgroep	48
5.2.3a	Volprieausen Formatie	49
5.2.3b	Detfurth Formatie	49
5.2.3c	Hardeggen Formatie	49
5.3	Boven-Germaanse Trias Groep	50
5.3.1	Stratigrafie	50
5.3.2	Solling Formatie	50
5.3.3	Röt Formatie	51
5.3.4	Muschelkalk Formatie	51
5.3.5	Keuper Formatie	52
5.4	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	53
6	Altena Groep	55
6.1	Stratigrafie	55
6.1.1	Sleen Formatie	55
6.1.2	Aalburg Formatie	56
6.1.3	Posidonia Schalie Formatie	57
6.1.4	Werkendam Formatie	57
6.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	57
7	Nedersaksen Groep	59
7.1	Stratigrafie	59
7.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	60
8	Rijnland Groep	62
8.1	Stratigrafie	62
8.1.1	Vlieland Subgroep	62
8.1.1a	Vlieland Zandsteen Formatie	63
8.1.1b	Vlieland Kleisteen Formatie	64
8.1.2	Holland Formatie	64
8.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	65
9	Krijtkalk Groep	67
9.1	Stratigrafie	67
9.1.1	Texel Formatie	67
9.1.2	Ommelanden Formatie	67
9.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	69
10	Noordzee Supergroep	70
10.1	Stratigrafie	70
10.1.1	Onder-Noordzee Groep	71
10.1.2	Midden-Noordzee Groep	72
10.1.3	Boven-Noordzee Groep	73
10.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	75

11 Geologische geschiedenis 77

- 11.1 Inleiding 77
- 11.2 Bekkenontwikkeling, sedimentatie en tektoniek 77
 - 11.2.1 Laat-Carboon 77
 - 11.2.2 Perm 79
 - 11.2.3 Trias 80
 - 11.2.4 Jura 81
 - 11.2.5 Krijt 83
 - 11.2.6 Kenozoïcum 84
- 11.3 Zoutbewegingen 85
 - 11.3.1 Inleiding 85
 - 11.3.2 Gesteente-eigenschappen en ontstaansmechanisme 86
 - 11.3.3 Groepen en individuele zoutstructuren 87
- 11.4 Geochemische evaluatie en begravingsgeschiedenis 92
 - 11.4.1 Inleiding 92
 - 11.4.2 Resultaten 93

Appendices 99

- Appendix A: Overzicht gebruikte seismische gegevens 101
- Appendix B: Overzicht gebruikte boringen 102
- Appendix C: Reservoirsommities Boven-Rotliegend Groep 105
- Appendix D: Show, status en testgegevens Boven-Rotliegend Groep 107

Referenties 108

- Literatuurreferenties 108
- Interne rapporten van de Rijks Geologische Dienst 112

Kaarten en profielen

- Kaart 1: Diepte van de basis van de Boven-Rotliegend Groep
- Kaart 2: Diepte van de basis van de Zechstein Groep
- Kaart 3: Diepte van de top van de Zechstein Groep
- Kaart 4: Dikte van de Zechstein Groep
- Kaart 5: Diepte van de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep
- Kaart 6: Dikte van de Onder- en Boven-Germaanse Trias Groepen
- Kaart 7: Diepte van de basis van de Altena Groep
- Kaart 8: Dikte van de Altena Groep
- Kaart 9: Diepte van de basis van de Rijnland Groep
- Kaart 10: Dikte van de Rijnland Groep
- Kaart 11: Diepte van de basis van de Krijtkalk Groep
- Kaart 12: Dikte van de Krijtkalk Groep
- Kaart 13: Diepte van de basis van de Noordzee Supergroep
- Kaart 14: Afdedekte geologische kaart beneden de basis van de Rijnland Groep
- Kaart 15: Structurele profielen

Eén van de hoofdtaken van de Rijks Geologische Dienst is het vergaren van kennis betreffende de geologie van Nederland. Rapportage hierover vindt ondermeer plaats in de vorm van kaarten en toelichtingen op deze kaarten. Tot nu toe beperkten de, door de Rijks Geologische Dienst uitgebrachte, kaarten met toelichting zich voornamelijk tot de ondiepe geologie van Nederland en de Noordzee. Dat rapportage over de diepe geologie (dieper dan ca. 500 m) slechts in beperkte mate werd verricht heeft te maken met de status van de benodigde gegevens. Deze gegevens worden verkregen uit seismisch onderzoek en uit diepboringen zoals bijna uitsluitend uitgevoerd door oliemaatschappijen. Vanwege de commerciële belangen in de exploratie industrie zijn de gegevens van confidentiële aard.

In het kader van mijnwettelijke verplichtingen worden de gegevens aan de Rijks Geologische Dienst ter beschikking gesteld. Voorzover zij worden verzameld op het continentale plat van Nederland, worden ze na een periode van 10 jaar vrijgegeven. Het verwerven van inzicht in de diepe geologie onder de Noordzee is daarom voor een ieder mogelijk. Belangstellenden kunnen hun eigen interpretaties maken. Voor het vaste land laat de bestaande mijnwetgeving deze vrijgave niet toe. Afspraken met de maatschappijen over het gebruik van deze gegevens hebben het mogelijk gemaakt dat de Rijks Geologische Dienst deze gegevens bewerkt en de resultaten daarvan publiceert, mits de gebruikte gegevens ouder zijn dan 10 jaar; een uitzondering geldt voor gegevens afkomstig uit concessie gebieden, waar een beperking geldt van 5 jaar. Volgens deze afspraak kan de Rijks Geologische Dienst toch een bredere bekendheid geven aan de geologische opbouw van de diepe ondergrond van Nederland.

Het kaartblad Rottumeroog-Groningen van de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland is het vijfde kaartblad dat wordt uitgebracht in het kader van een systematische kartering van de diepe ondergrond van Nederland gebaseerd op bovengenoemde gegevens. De complete atlas zal uit 15 kaartbladen bestaan, op een schaal van 1:250.000. De kaartbladindeling is weergegeven in figuur 1.1. In het jaarverslag van de Rijks Geologische Dienst wordt steeds een overzicht gegeven van de stand van zaken van deze kartering.

⑥ Ieder kaartblad heeft zijn eigen karakteristieken. Het voor u liggende blad toont de geologie van een belangrijk deel van de provincie Groningen. Kaarten en profielen laten een vrij stabiel gebied zien met als belangrijkste structurele eenheid het Groningen Hoog. De belangrijkste bewegingen in de ondergrond zijn hier veroorzaakt door het plastische Zechstein zout dat zich plaatselijk in de vorm van zoutkussens of grote zoutpijlers manifesteert. Deze zoutstructuren hebben vaak een belangrijke invloed op de verbreiding en dikte van de erbovenliggende Mesozoïsche en Kenozoïsche sedimenten. De ontdekking van het binnen het kaartblad liggende reusachtige Groningen gasveld (1959) heeft geleid tot een intensief onderzoek naar de ondergrond en de daarin aanwezige bodemschatten. De hierbij vergaarde gegevens hebben het mogelijk gemaakt de Nederlandse ondergrond in kaart te brengen.

De Rijks Geologische Dienst spreekt de verwachting uit dat deze serie kaarten een bijdrage levert aan een grotere bekendheid met en inzicht in de opbouw en de samenstelling van de diepe ondergrond van Nederland. Dit is niet alleen van belang voor maatschappijen die actief zijn op het terrein van delfstoffenexploratie en -exploitatie, maar ook voor de rijksoverheid, provinciale, gemeentelijke en semi-overheidsinstellingen en maatschappelijke groeperingen. Deze worden immers de laatste jaren meer en meer geconfronteerd met vragen die betrekking hebben op de mogelijkheden die de diepe ondergrond van Nederland te bieden heeft. Hierbij kan onder andere worden gedacht aan afvalberging en energieopslag, en aan aardwarmte als alternatieve bron van energie. De toelichting bij deze kaarten is echter niet alleen gericht op de bij bedrijfsleven of overheid werkende aardwetenschapper, maar is evenzeer van belang voor onderwijs, wetenschap en de geïnteresseerde amateurgeoloog.

Bij het tot stand komen van dit kaartblad zijn veel medewerkers van de Rijks Geologische Dienst betrokken geweest. Hun aller inzet stel ik op hoge prijs. De relevante en opbouwende kritiek van de Dr.W.J.M. van der Linden en van de leescommissie heeft veel bijgedragen aan de kwaliteit van de toelichting. De prettige samenwerking met Dr. F. Kockel van de BGR heeft het mogelijk gemaakt tot aan de landsgrens een betrouwbaar kaartbeeld te vervaardigen. Speciale dank is verschuldigd aan de maatschappijen wiens exploratiegegevens in deze kartering zijn gebruikt.

Chr. Staudt,
Directeur

1 Inleiding

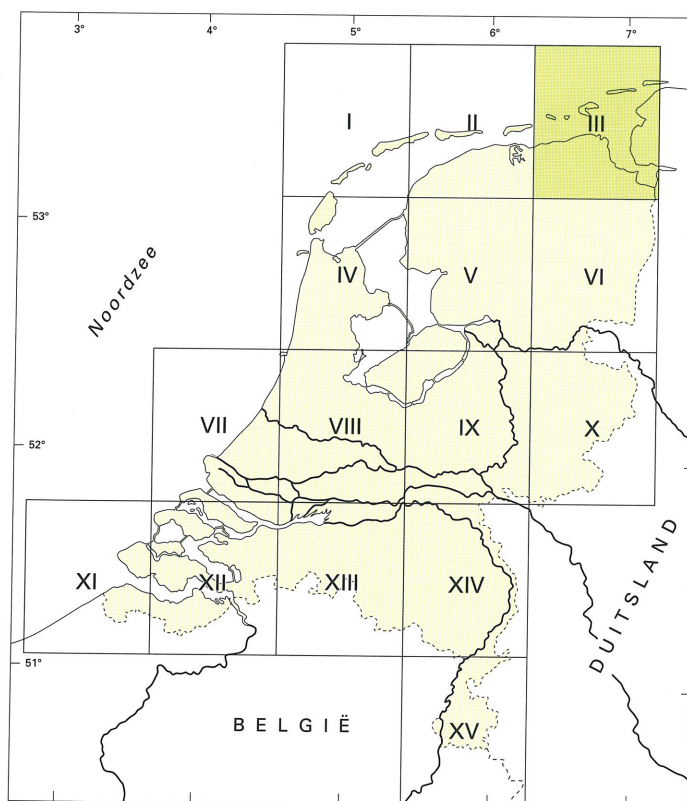
1.1 Begrenzing van het studiegebied

Kaartblad III: Rottumeroog - Groningen is gelegen in het uiterste noordoosten van Nederland en strekt zich uit tot aan de grens van de territoriale wateren (fig. 1.1). Het kaartblad omvat delen van de provincies Groningen en Drenthe.

1.2 Gegevensbestand

De kartering van de diepe ondergrond van Nederland is voornamelijk gebaseerd op de gegevens die door oliemaatschappijen zijn verzameld. In het kaartbladgebied is dit de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) die houder is van de concessies Groningen en Drenthe (fig. 1.2). Naast de vele gasboringen zijn er binnen het kaartbladgebied een 25-tal zoutboringen uitgevoerd door verschillende maatschappijen: Shell Delfstoffen Nederland N.V. (SHL), Billiton Delfstoffen B.V. (BIL), Noordelijke Zoutwinning B.V. (NZW), thans NedMag Industries, en de Koninklijke Nederlandse Zoutindustrie (KNZ), thans AKZO-Nobel. In het totaal zijn in het kaartbladgebied 403 boringen

Figuur 1.1 Kaartbladindeling van de regionale kartering van de diepe ondergrond van Nederland en de ligging van het kaartblad III.



I	Vlieland-Terschelling	IX	Harderwijk-Nijmegen
II	Ameland-Leeuwarden	X	Almelo-Winterswijk
III	Rottumeroog-Groningen	XI	Middelburg-Breskens
IV	Texel-Purmerend	XII	Roozendaal-Terneuzen
V	Sneek-Zwolle	XIII	Breda-Valkenswaard
VI	Veendam-Hoogeveen	XIV	Oss-Roermond
VII	Noordwijk-Rotterdam	XV	Sittard-Maastricht
VIII	Amsterdam-Gorinchem		

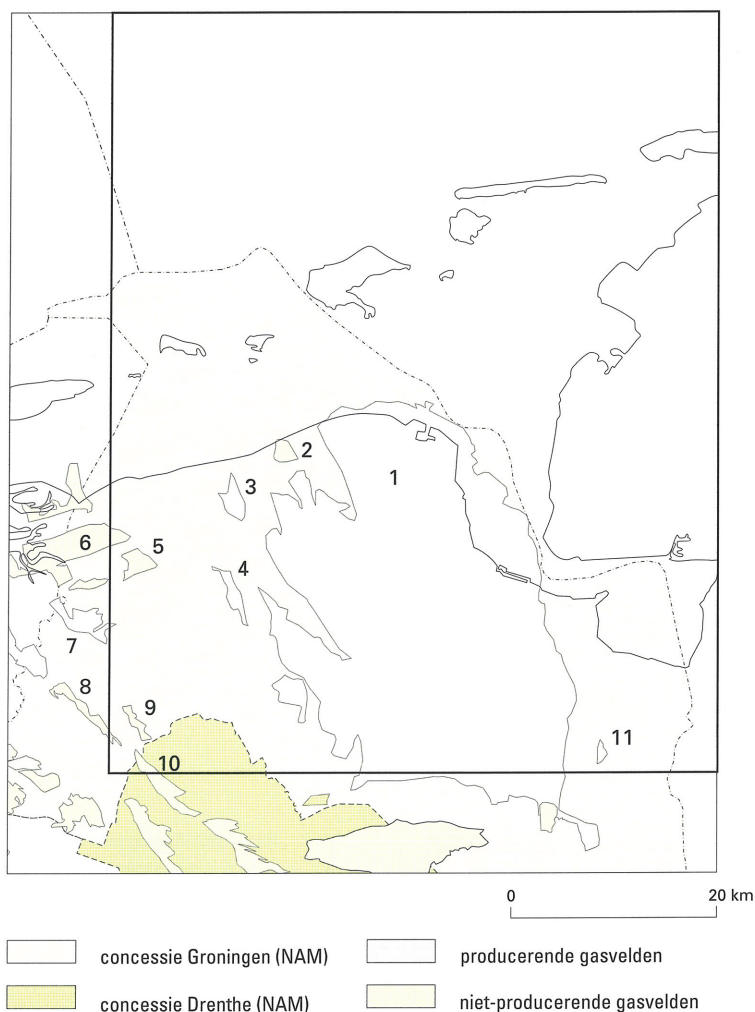
uitgevoerd, waarvan 387 boringen ouder zijn dan vijf jaar en beschikbaar voor deze kartering (zie Voorwoord). Deze 387 boringen zijn voor een deel gegroepeerd in 57 clusters. Figuur 1.3 is een locatiekaart van de in deze toelichting gebruikte boringen. De boringen geven samen met de vele kilometers seismische lijnen, die in dit gebied zijn geschoten, een goed inzicht in de geologie. Op het land is voor de kartering voornamelijk gebruik gemaakt van een selectie van lijnen uit 3D-surveys (fig. 1.4). Op de Waddenzee is veelal oudere, kwalitatief mindere, 2D-seismiek beschikbaar. Naast deze gegevens is gebruik gemaakt van de beschikbare literatuur. Het regionaal geologische kader is ontleend aan publicaties van o.a. Ziegler (1982, 1990), Glennie (1986) en Heybroek (1974).

1.3 Delfstoffen

1.3a Exploratie- en produktiegeschiedenis van het Groningen gasveld

Het relatief grote aantal boringen binnen het kaartblad is het gevolg van de ontdekking van het Groningen gasveld in 1959. In 1952 werd bij Haren de eerste boring in de provincie Groningen uitgevoerd met als doel de Zechstein carbonaten. Dit waren tot het einde van de vijftiger jaren de

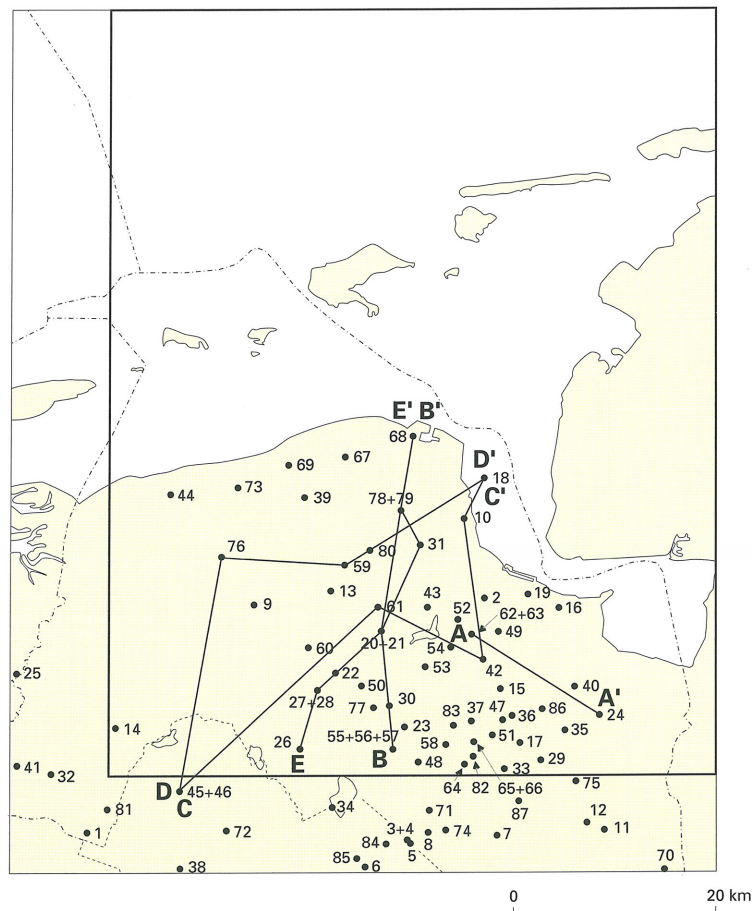
Figuur 1.2 Overzichtskaat van de binnen het kaartbladgebied vallende concessies Groningen en Drenthe. De NAM is in beide concessies de concessiehouder. Van alle aangetoonde gasvelden (per 1/1/1995) bevindt het reservoir zich in de zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep. De zich binnen het kaartbladgebied uitstreckende gasvelden zijn: 1 Groningen, 2 Usquert, 3 Warffum, 4 Bedum, 5 Saaksum, 6 Munnekeziel, 7 Grijskerk, 8 Boerakker, 9 Pasop, 10 Roden, 11 Blijham.



diepste gas-producerende eenheden (m.n. in Drenthe). De carbonaten bleken in de boring Haren-1 anhydritisch ontwikkeld en vormden zodoende geen reservoir. Maar daaronder werd een continentale zandsteen van de Boven-Rotliegend Groep met zeer goede reservoir eigenschappen aangetroffen. Helaas was deze hier echter watervoerend. De tweede test van het Rotliegend, de boring Ten Boer-1 (1955), vond het Rotliegend in een kleisteenfacies (later het Ten Boer Laagpakket genoemd). Ondanks het herkennen van meerdere prospectieve structuren op de seismische lijnen noopte de Suez-crisis in 1956 tot een verandering van het boorprogramma. De boorinstallaties werden gebruikt om de reeds aangetoonde olievoorkomens in Zuid-Holland verder te ontwikkelen. Pas vier jaar later (1959) werd er weer een boring in noordoostelijk Nederland uitgevoerd, de historische boring Slochteren-1 (Knaap & Coenen, 1987). Met deze boring werd de Rotliegend zandsteen gasvoerend aangetroffen en was de ontdekking van het Groningen gasveld een feit. Na succesvolle boringen Delfzijl-1, Slochteren-2, de verdiepte Ten Boer-1, Noordbroek-1 en Schildmeer-1 drong geleidelijk het besef door dat men te maken had met één groot reservoir. De krantekoppen in de jaren '59 en '60 weerspiegelen dit met in de loop der tijd, toenemende reserve ramingen. Deze liepen op van enige tientallen tot meer dan 1000 miljard m³. Later zou blijken dat het Groningen gasveld een lengte heeft van 35 km en een breedte van 25 km en daarmee een belangrijk deel van de provincie beslaat.

In 1963 verkreeg de NAM de produktierechten voor bijna de gehele provincie Groningen. Sinds die concessieverlening zijn er 57 putgroepen geboord. Het Groningen gasveld wordt geëxploiteerd door middel van 29 putgroepen die elk een verwerkingsstation hebben.

Figuur 1.3 Locatiekaart van de boringen die bij de kartering zijn gebruikt. Voor de nummering wordt verwezen naar appendix B waar de naam, eigenaar, einddiepte en ouderdom van de boringen wordt vermeld. Tevens zijn de trajecten van de (log)profielen van de figuren 2.2, 3.3, 8.1, 9.1 en 10.2 aangegeven.



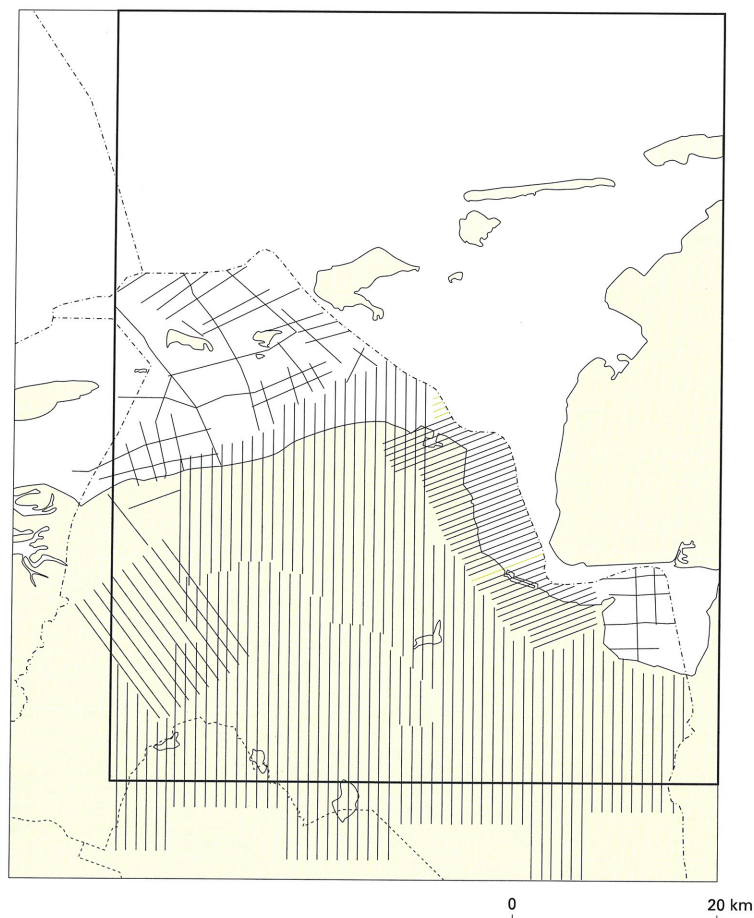
Seismische kartering met verbeterde methoden leidde tot nauwkeurigere, steeds weer hogere schattingen van het gasvolume van het Groningen gasveld. Met een voorspeld totaal volume aan gas (GIIP) van 2956 miljard m³ (per 1-1-1995) is het Groningen gasveld het grootste gasveld van Europa en één van de grootste in de wereld. Uit het Groningen veld werd in 1994 36,5 miljard m³ aardgas geproduceerd. Dit staat ongeveer gelijk met het jaarlijks binnenlands verbruik. In figuur 1.5 staat voor de jaren '64 tot en met '94 het totale volume aan gas (GIIP) uitgezet. Dit volume is onderverdeeld in het geproduceerde gas, het nog winbare gas en het niet winbare gas dat bij sluiting in het veld zal achterblijven. Door nieuwe produktiemethoden is sinds 1990 het berekende percentage winbaar gas vergroot tot meer dan 90% van het GIIP. De resterende reserve bedraagt per 1-1-1995 ca. 1362 miljard m³ (Ministerie van Economische Zaken, 1995).

Rond het Groningen veld liggen binnen het kaartbladgebied de velden Usquert, Warffum, Bedum, Pasop, Saaksum, Blijham en voor een deel de velden Munnekeziel, Grijskerk, Boerakker en Roden (fig. 1.2). In al deze velden vormen de zandstenen van het Boven-Rotliegend het reservoirgesteente.

1.3b Zoutwinning

Nadat eind veertiger en begin vijftiger jaren op grond van boringen en gravimetrisch onderzoek de aanwezigheid van ondiep gelegen zoutpijlers in Noordoost-Nederland bekend geworden was, kreeg de Koninklijke Nederlandse Zoutindustrie belangstelling voor dit gebied. In 1954 werd de concessie

Figuur 1.4 Locatiekaart van het, voor de kartering gebruikte, seismische lijnennet. Appendix A geeft nadere informatie omtrent de eigenaar en de ouderdom van de verschillende 2D en 3D surveys.



Adolph van Nassau verleend voor het gebied rondom de, zuidelijk van het kaartbladgebied gelegen, zoutpijler Zuidwending. In 1967 werd de concessie uitgebreid met het gebied rondom de zoutstructuur Winschoten. In deze structuur zijn inmiddels een twaalfal winningsboringen gezet. De productie uit de Adolph van Nassau concessie bedroeg in 1994 2530 kiloton steenzout uit de Z2 (Stassfurt) Formatie. Verder bestaat sinds 1980 de concessie Veendam die zich uitstrekt tot in het uiterste zuiden van het kaartbladgebied. Hier worden door NedMag Industries kalium-magnesium zouten gewonnen. In 1994 werd 178,2 kiloton kalium-magnesium zout uit de Z3 (Leine) Formatie geproduceerd, waarvan 145 kiloton magnesium zout. In beide concessies komt de zoutwinning middels oplossings-mijnbouw tot stand. Een verkenningsboring in de zoutpijler Pieterburen (1970) heeft een beeld gegeven van de intern sterk verplooide Zechstein zoutlagen. Deze boring heeft geen vervolg gehad.

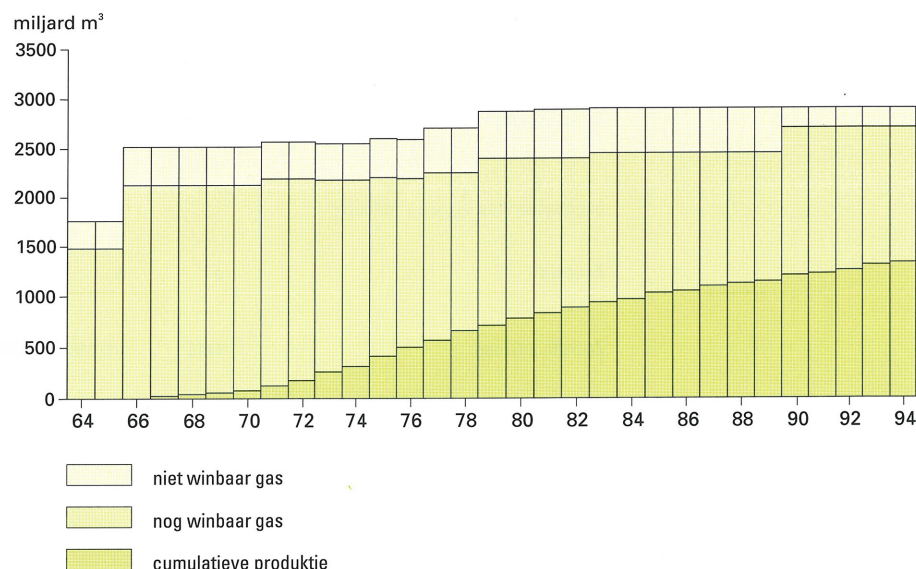
1.4 Opzet van het onderzoek

Seismische kartering

Het onderzoek richtte zich op de systematische, structureel-geologische kartering op basis van seismische reflectiegegevens. Bij deze regionale kartering is gekozen voor een seismisch lijnennet met mazen van maximaal 4 bij 4 kilometer. In de Waddenzee kon geen hoge lijnendichtheid gerealiseerd worden. Dit is deels het gevolg van de beperkingen die de maatschappijen opgelegd kregen samenhangende met natuurbescherming. Daarnaast zijn door de sterk wisselende waterdiepten op het wad, speciale opname technieken vereist. Mogelijk speelt gezien de geringe bedekking ook de toenmalig vermeende beperkte prospectiviteit van dit gebied een rol. De gebruikte seismische lijnen in de Waddenzee stammen uit de periode van 1964 tot 1985. Op het land is voor de kartering voornamelijk gebruik gemaakt van 3D-seismiek, geschoten tussen 1983 en 1988. De afstand tussen de hieruit geselecteerde en geïnterpreteerde lijnen is 1000 m.

Appendix A geeft een overzicht van de gebruikte seismiek. De ligging ervan is weergegeven in figuur 1.4.

Figuur 1.5 Reserve- en productie-cijfers van het Groningen gasveld. Uit dit figuur blijkt zowel de toename van de verwachte totale (winbare) gasreserve als de toename van het totale gasvolume (GIIP).



De vervolgde reflectoren vormen de grensvlakken tussen lithostratigrafische eenheden (groepen en formaties). Voor de calibratie van de seismische gegevens met de boorgatgegevens werd gebruik gemaakt van de akoestische logs en de putschietgegevens.

De omzetting van de in tijd opgenomen seismische secties naar dieptewaarden in meters is laagsgewijs uitgevoerd (de layer-cake methode). De lagen, die corresponderen met de lithostratigrafische indeling, hebben elk een specifieke snelheidsverdeling. Hiervoor is een lineair verband aangenomen tussen de snelheid en de diepte van de laag ($V_z = V_0 + kz$; zie tabel 1). Voor de Zechstein Groep is, gezien de specifieke lithostratigrafische opbouw, voor een hyperbolisch verband tussen de interval-snelheid en het tijdsinterval gekozen ($V_{\text{int}} = a + [d/(\delta t - b)]^c$; zie tabel 1).

Om een consistente aansluiting van aan elkaar grenzende kaartbladen te garanderen, worden voor alle kaartbladen dezelfde snelheids-relaties gebruikt. De parameters van deze landelijke snelheidsverdeling zijn bepaald uit de akoestische gegevens van 65 over geheel Nederland verspreide boringen. Bij het

Tabel 1 Toegepaste snelheidsverdelingen

a. gebaseerd op $V_z = V_0 + kz$

V_z = formatie/groep-snelheid op diepte z (m/s)
 V_0 = formatie/groep-snelheid op diepte 0 (m/s)
 k = constante (1/s)
 z = diepte (m)

Eenheid	V_0	k
Noordzee Supergroep	1696	0,49
Krijtkalk Groep	2092	1,08
Holland Formatie	2020	0,63
Vlieland Subgroep	2051	0,41
Nedersaksen Groep	1507	0,82
Onder- en Boven-Germaanse		
Trias Groep	2293	0,69
Boven-Rotliegend Groep	3535	0,18

b. gebaseerd op $V_{\text{int}} = a + [d/(\delta t - b)]^c$

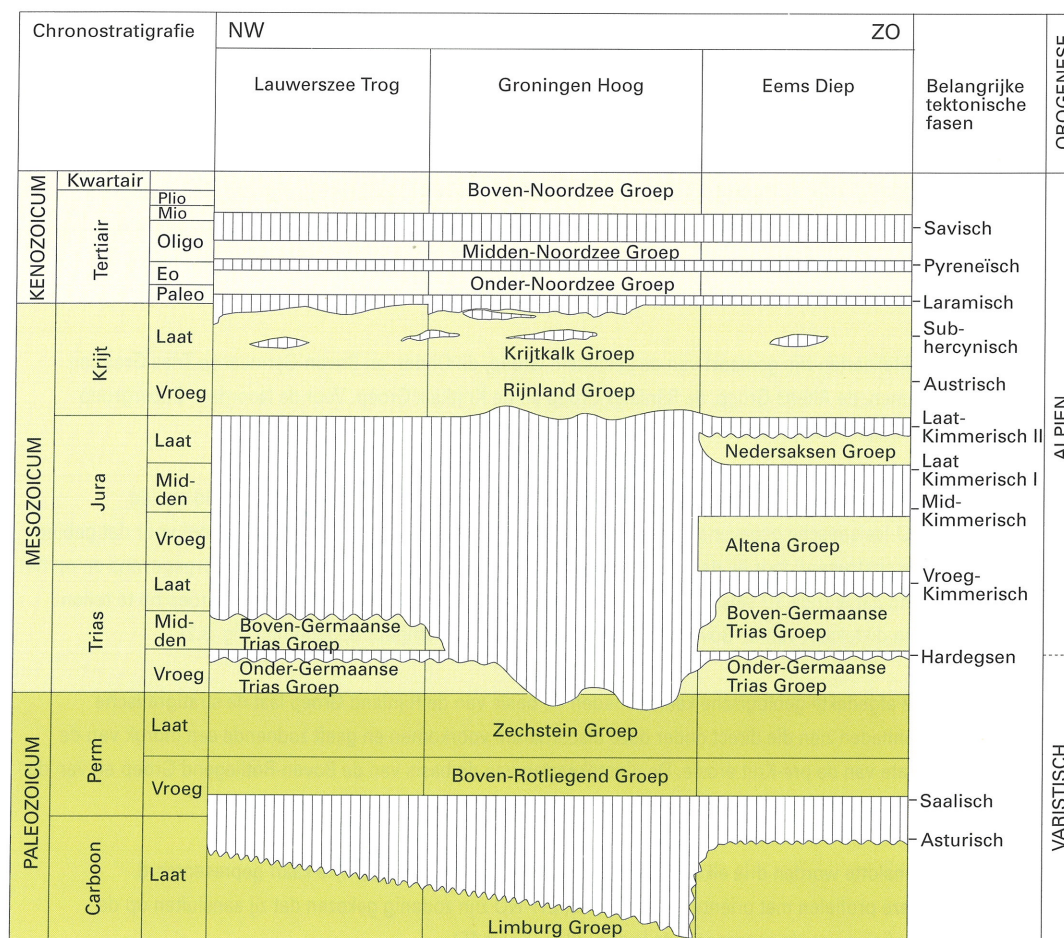
Eenheid	a	b	c	d
Zechstein Groep	4410	- 0,018	1	47,36

V_{int} = intervalsnelheid (m/s)
 δt = tijdsinterval Zechstein (s)
 a = asymptoot intervalsnelheid (m/s)
 b = asymptoot δt (s)
 c = constante
 d = constante (m)

bepalen van de parameters wordt een maximale fout van 5% in de seismisch bepaalde diepte van een bepaald niveau toelaatbaar geacht. Tabel 1 geeft een overzicht van de parameters die voor de snelheidsverdeling gebruikt zijn.

Geologisch onderzoek

Het geologisch onderzoek richtte zich op de lithostratigrafische opbouw van de binnen het kaartblad-gebied aanwezige gesteenten (fig. 1.6) en hun geologische geschiedenis tegen de achtergrond van de regionale ontwikkelingen. Hierbij werd gebruik gemaakt van eerder genoemde seismische gegevens en boorgatmetingen, aangevuld met gegevens afkomstig uit lithologisch en biostratigrafisch onderzoek aan gesteentemonsters. Een overzicht van de gebruikte boringen wordt in appendix B gegeven. De locaties zijn weergegeven in figuur 1.3. In figuur 1.7 staat de geologische tijdstabel weergegeven zoals die in deze toelichting gehanteerd is (Harland et al., 1990).



Figuur 1.6 Schema van de lithostratigrafische eenheden en de voor de geologische ontwikkeling belangrijke tektonische fasen. De verticale arcering geeft de hiaten aan.

Petrofysisch onderzoek

Naast het geologisch onderzoek is ook aandacht besteed aan de eigenschappen van de reservoir-gesteenten binnen het kaartbladgebied (RGD, 1993). Van 20 boringen zijn boorgatmetingen en kernanalyses bewerkt voor het berekenen van porositeiten; deze staan getabelleerd in appendix C. Appendix D toont een aantal testgegevens. Hiervan zijn er vijf afkomstig van het Groningen gasveld.

Geochemisch onderzoek

Vitrinietmetingen zijn uitgevoerd aan koolhoudende lagen van de Limburg Groep en aan de Koperschalie van de Zechstein Groep teneinde de begravingsgeschiedenis van het kaartbladgebied te reconstrueren (RGD, 1994). De werkmethode, de resultaten van de metingen en de uitgevoerde modelleringen worden behandeld in paragraaf 11.4.

1.5 Kaarten en profielen

De resultaten van de seismische kartering zijn weergegeven op een reeks diepte- en diktekaarten van de lithostratigrafische groepen, op afgedekte kaarten en in drie profielen. De indeling van de lithostratigrafische groepen is schematisch weergegeven in figuur 1.6. Dieptekaarten zijn gemaakt van de bases van de Boven-Rotliegend Groep, de Zechstein Groep, de Onder-Germaanse Trias Groep, de Altena Groep, de Rijnland Groep, de Krijtkalk Groep en de Noordzee Supergroep. Een dieptekaart van de basis van de Boven-Noordzee Groep is als tekstfiguur opgenomen (fig. 10.4). Van de belangrijke discordantie aan de basis van de Rijnland Groep is een afgedekte kaart gemaakt. Tevens is er een dieptekaart gemaakt van de top van de Zechstein Groep.

Diktekaarten zijn gemaakt van de Zechstein Groep, de Onder- en Boven-Germaanse Trias Groepen samen, de Altena Groep, de Rijnland Groep en de Krijtkalk Groep. Voor de Noordzee Supergroep volstaat de dieptekaart van de basis als diktekaart.

In de Waddenzee kon de basis van de Boven-Rotliegend Groep niet overal op grond van de (2D-)seismische gegevens bepaald worden. De dieptekaart van deze groep is daarom voor dat gebied geconstrueerd door bij de diepte van de basis van de Zechstein Groep een, uit boorgegevens en op het land aanwezige 3D-seismiek afgeleide, regionale dikte van de Boven-Rotliegend Groep op te tellen. Een diktekaart van de Boven-Rotliegend Groep is als tekstfiguur opgenomen (fig. 3.2).

De afgedekte geologische kaart beneden de basis van de Rijnland Groep laat de stratigrafische eenheden zien die direct onder deze discordantie voorkomen en geeft zodoende een indruk van de mate van de pré-Krijt erosie. De dieptekaarten van de basis van de Boven-Rotliegend Groep en van de Zechstein Groep (Kaarten 1 & 2) geven de structurele trend van het gebied weer.

Tenslotte worden drie elkaar kruisende profielen op een afzonderlijke kaart gepresenteerd. Deze profielen met oriëntaties NW-ZO en ZW-NO zijn zodanig gekozen dat zij aansluiten op de profielen van de aangrenzende kaartbladen (Kaart 15).

Figuur 1.7 Geologische tijdstabel, zoals in de toelichting gehanteerd. De in de tekst genoemde tektonische fasen zijn eveneens aangegeven (naar Harland et al., 1990).

Tijd in milj. jaren	Hoofdtijdperk	Periode	Tijdvak	Tijd	Orogenese
					Belangrijke tektonische fasen
1.64	KENOZOÏCUM	Kwartair	Holoceen/Pleistoceen	Reuverien	Savisch Pyreneisch Laramisch
				Brunssumien	
		Naogeen	Pliocene	Messinien	
				Tortonien	
			Mioceen	Serravallien	
				Langhien	
				Burdigalien	
		Paleogeen	Oligoceen	Aquitaniën	
				Chattien	
			Eoceen	Rupelien	
				Priabonien	
				Bartonien	
				Lutetien	
			Paleoceen	Ypresien	
				Thanetien	
65	MESOZOÏCUM	Krijt	Laat-Krijt	Danien	Subhercynisch Austrisch
				Maastrichtien	
				Campanien	
				Santonien	
				Coniacien	
			Vroeg-Krijt	Turonien	
				Cenomanien	
				Albien	
				Aptien	
				Barremien	
143		Jura	Laat	Hauterivien	Laat-Kimmerisch II Laat-Kimmerisch I Mid-Kimmerisch Vroeg-Kimmerisch
				Valanginien	
				Ryazanien	
				Portlandien	
				Kimmeridgien	
			Midden	Oxfordien	
				Callovien	
				Bathonien	
				Bajocien	
				Aalenien	
208		Trias	Vroeg	Toarcien	Vroeg-Kimmerisch
				Pliensbachien	
				Sinemurien	
				Hettangien	
				Rhaetien	
			Laat	Norien	
				Carnien	
				Ladinien	
				Anisien	
				Scythien	
245	PALEOZOÏCUM	Perm	Laat	Muschelkalk	Hardeggen
				Bontzandsteen	
			Vroeg	Zechstein	
				Thuringien	
				Saxonien	
		Carboon	Laat	Rotliegend	Saalisch Asturisch Sudetisch
				Autunien	
				Stefanien	
			Vroeg	Westfalien	
				Namurien	
290				Viseen	
				Tournaisien	
363					

1.6 Toelichting

De toelichting beoogt de informatie van de verschillende kaarten te ondersteunen en daarmee een zo volledig mogelijk beeld te geven van de geologie van het kaartbladgebied. De lithologische groepen worden van oud naar jong per hoofdstuk beschreven. Hierin komen telkens de lithostratigrafie, de sedimentaire ontwikkeling en de paleogeografie aan de orde. In hoofdstuk 3 wordt de petrofysica van de economisch belangrijke Boven-Rotliegend Groep geëvalueerd. Aan het einde van de toelichting, in hoofdstuk 11, wordt de geologische geschiedenis van het kaartbladgebied per tijdsperiode besproken. Dit hoofdstuk vormt een compilatie van de voorgaande hoofdstukken in samenhang met de structurele ontwikkeling. Voorts wordt ingegaan op de belangrijke rol die de zoutbewegingen gespeeld hebben; tot slot wordt de gasgeneratie in het kaartbladgebied behandeld die gemodelleerd is aan de hand van de begravingsgeschiedenis en de geochemische analyse van het Carboon en de Koperschalie.

Tenzij anders vermeld is de lithostratigrafie conform de Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPA (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995). Bij de beschrijving van de lithostratigrafie is de nadruk gelegd op de variatie en verbreiding van de verschillende groepen, formaties en laagpakketten. De verbreiding is veelal gerelateerd aan de belangrijke structurele elementen van het kaartbladgebied, welke in paragraaf 1.7 worden beschreven.

Van de Nedersaksen Groep en de Boven-Noordzee Groep zijn kaarten als tekstfiguur in de toelichting opgenomen. De Kenozoïsche sedimenten worden niet op groepsniveau, maar in één geheel als de Noordzee Supergroep behandeld. Bovendien beperkt de beschrijving zich tot de Tertiaire sedimenten. De beschrijving van de Kwartaire afzettingen wordt in de komende jaren gepubliceerd middels de 'Toelichting van de geologische kaart van Nederland 1:50.000' van de Rijks Geologische Dienst.

1.7 Samenvatting

1.7.1 Stratigrafische opeenvolging

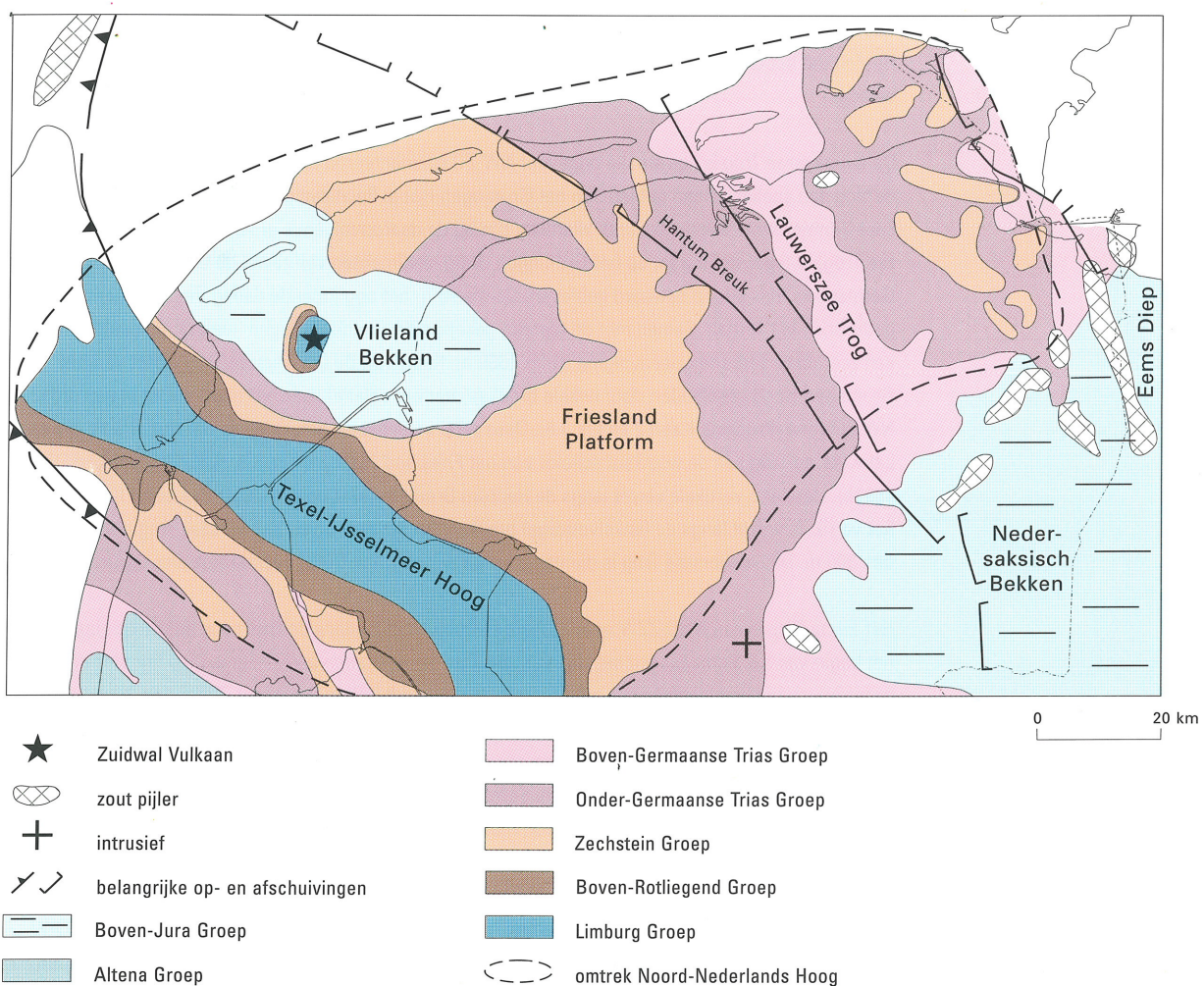
De lithostratigrafische opeenvolging in het kaartbladgebied wordt hieronder beschreven en is schematisch weergegeven in figuur 1.6. Het schema laat een driedeling zien van het kaartbladgebied. Als gevolg van de structurele ontwikkeling zijn in de Lauwerszee Trog, het Groningen Hoog en het Eems Diep verschillende sedimentaire opeenvolgingen afgezet en/of bewaard gebleven.

De fluviatiele en lacustriene sedimenten uit het Westfalen zijn klastisch van samenstelling en zijn in een vochtig tropisch klimaat afgezet. De sedimenten van de Boven-Rotliegend Groep uit het Vroeg-Perm zijn eveneens opgebouwd uit klastisch materiaal en afgezet in een lacustrien en fluviatiel milieu, maar nu onder aride condities, in een playagebied (fig. 3.5). Deze grote klimaatsverandering was het gevolg van het opbreken en uiteendrijven van het Gondwana supercontinent. De Zechstein Groep uit het Laat-Perm omvat een vijftal evaporietcycli. Deze opeenvolgingen van klei, carbonaat, anhydriet en steenzout zijn aanvankelijk gevormd onder mariene omstandigheden. De vierde en vijfde cyclus hebben een continentaal karakter. De Onder-Germaanse Trias Groep bestaat opnieuw uit klastische, continentale (fluviatiele en lacustriene) afzettingen. De opbouw van de Boven-Germaanse Trias Groep weerspiegelt, door de aanwezigheid van carbonaten en evaporieten, een toenemende mariene invloed. De Altena Groep en de Nedersaksen Groep uit de Jura bestaan uit zeer fijnkorrelig klastisch materiaal dat varieert van vol marien tot lagunair/lacustrien. Deze afzettingen zijn alleen in het uiterste zuidoosten van het kaartbladgebied aanwezig. Gedurende het Krijt werden mariene sedimenten afgezet. Zij worden onderverdeeld in de klastische Onder-Krijt sedimenten van de Rijnland Groep en de mariene carbonaten van de Krijtkalk Groep uit het Laat-Krijt. De Kenozoïsche opeenvolging bestaat

uit klastische sedimenten die afwisselend onder mariene en continentale omstandigheden zijn afgezet. Perioden van erosie hebben geresulteerd in verscheidene hiaten en, in combinatie met tektonische fasen, in hoekdiscordanties in de stratigrafische opeenvolging.

1.7.2 Structurele eenheden

In fig. 1.8 zijn de structurele eenheden van Noord-Nederland aangegeven. Deze eenheden werden sterk geprononceerd tijdens de Laat-Kimmerische erosiefase, maar hebben waarschijnlijk een Varistische oorsprong. Tijdens de latere tektonische fasen zijn zij gereactiveerd en gemodificeerd. De dieptekaarten van de basis van de Boven-Rotliegend en Zechstein Groep (Kaart 1 & 2) geven de structurele trend weer van het kaartbladgebied. De overheersende breukrichting op het Groningen



Figuur 1.8 Afdgedekte geologische kaart van de Laat-Kimmerische II discordantie (Vroeg-Krijt) in Noord-Nederland. Variatie in

ouderdom van de afdgedekte stratigrafische eenheden geeft een indicatie van het reliëf ten tijde van

de erosie. De belangrijkste structurele elementen zijn in deze figuur aangegeven.

Hoog is NNW-ZZO. In het zuidwesten, binnen de Lauwerszee Trog, domineert een WZW-ONO richting (zie hoofdstuk 6).

Het kaartbladgebied wordt gedomineerd door het Groningen Hoog. Dit hoog wordt in het zuidwesten begrensd door de Lauwerszee Trog en in het oosten door het Eems Diep. Tijdens de Jura ontwikkelt zich, ten zuiden van het Groningen Hoog, het Nedersaksisch Bekken.

Het *Groningen Hoog* wordt gekenmerkt door relatief dunne Boven-Carboon en Trias afzettingen, en het ontbreken van Jura afzettingen. Dit is het gevolg van opheffingsperiodes aan het begin van het Perm, de Saalische deformatiefase, en aan het einde van de Jura, de Kimmerische deformatiefasen. De afgedekte kaart beneden de Rijnland Groep (Kaart 14) laat zien dat de Onder-Krijt afzettingen van de Rijnland Groep direct rusten op de veel oudere sedimenten van de Onder-Germaanse Trias Groep of zelfs de Zechstein Groep (fig. 1.6). Tijdens het Krijt en Tertiair veranderde de omtrek van het Groningen Hoog. De noordelijke rand van het hoog daalde in deze periode sterker dan het centrale deel waardoor een dik pakket Krijt en Tertiaire sedimenten in het gebied van de Waddenzee kon worden afgezet. Het feit dat het Groningen Hoog het gelijknamige gasveld herbergt geeft het een enorm economisch belang.

De *Lauwerszee Trog* is een smalle ongeveer NW-ZO georiënteerde eenheid. Reeds in het Carboon was de trog een sneller dalend gebied dan het Groningen Hoog. Relatieve daling trad ook op tijdens de Laat-Kimmerische fase (Laat-Jura). Hierdoor zijn bij de daaropvolgende erosieperiode in de Lauwerszee Trog, in tegenstelling tot op het Groningen Hoog, sedimenten van zowel de Onder- als Boven-Germaanse Trias Groep bewaard gebleven. De meest in het oog lopende daling treedt echter op gedurende het Tertiair. Samen met de hieraan gekoppelde zoutbewegingen heeft dit geresulteerd in een zeer dikke Tertiaire opeenvolging (ruim 1650 m, Kaart 13). De Lauwerszee Trog wordt van het Groningen Hoog gescheiden door enkele breuken met een relatief klein, vertikaal verzet in een smalle NW-ZO zone (Profiel 2, Kaart 2 en fig. 1.8). Deze zone verschilt duidelijk van de *Hantum Breuk*, die de Lauwerszee Trog aan de westkant scheidt van het *Friesland Platform* (fig. 1.8; Rijks Geologische Dienst, 1991b). Het netto verticale verzet langs de Hantum Breuk(zone) is op sommige plaatsen 1100 m, terwijl het verticale verzet langs de (enkelvoudige) breuken ten oosten van de Lauwerszee Trog nooit meer is dan 300 m. De Lauwerszee Trog is diensgevolge een asymmetrisch ontwikkelde slenkstructuur.

Het *Eems Diep* is een NNO-ZZW georiënteerde structuur die tijdens de Saalische deformatiefase aan het begin van het Perm is ontstaan (fig. 2.1). Slechts de westrand van het Eems Diep ligt binnen de grenzen van het kaartbladgebied, het grootste deel bevindt zich in Duitsland. Tijdens de Trias werd het Eems Diep gereactiveerd waardoor in het centrum een bijna complete Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep is afgezet (fig. 5.1). In het diep zijn de Trias en Jura sedimenten in belangrijke mate bewaard gebleven. Vanaf de Jura was het Eems Diep niet meer actief en zijn de bewegingen in de aardkorst in dit gebied gerelateerd aan een nieuwe structurele eenheid, het Nedersaksisch Bekken.

Het *Nedersaksisch Bekken* is een WNW-OZO strekkend bekken van Jura en Krijt ouderdom. De noordelijke grens valt min of meer samen met de zuidelijke kaartbladbegrenzing. Dit zijn de O-W strekkende breuken in het uiterste zuiden op Kaart 2 (Dieptekaart Basis Zechstein). Net ten noorden van het eigenlijke Nedersaksisch Bekken is in een door zoutvloeï (halokinese) beïnvloed subbekken tussen de zoutstructuren Winschoten, Klein-Ulsda en Landschapspolder een dunne opeenvolging van Jura sedimenten bewaard gebleven (Kaart 8).

1.7.3 Geologische geschiedenis

Tijdens de laatste fase van de Varistische Orogenese in het Vroeg-Perm (Saalische fase) werd het Groningen Hoog opgeheven. De hierbij ontstane structuren vormden een raamwerk tijdens de latere deformatiefasen. De periode vanaf het Perm tot en met de Vroeg-Jura was er een van bekkendaling en sedimentatie. Dit werd slechts onderbroken door lichte differentiële opheffing en erosie gedurende de Hardeggen en Vroeg-Kimmerische fasen (fig. 1.6). De Laat-Jura was een periode met sterke differentiële bewegingen waarbij diep insnijdende erosie optrad. De afgedekte kaart onder de Laat-Kimmerische discordantie geeft hiervan een goed beeld (fig. 1.8, Kaart 14). Regionale daling werd hervat in het Vroeg-Krijt. Een compressief krachtveld onderbrak deze daling aan het einde van het Krijt en het begin van het Tertiair, waardoor opheffing en sterke zoutbewegingen optraden die voor een sterk wisselende dikte in de Boven-Krijt en Tertiaire sedimenten heeft gezorgd (Kaarten 12 & 13). Door de plastische eigenschappen van zout hebben de dikke zoutpakketten van de tweede en derde Zechstein cyclus een belangrijke invloed gehad op de structurele en de sedimentaire ontwikkeling. Het Zechstein zout heeft de deformatie van het onder en bovenliggende gesteenten in belangrijke mate ontkoppeld. Daarnaast heeft het ontstaan van zoutstructuren de dikteontwikkeling van de post-Zechstein sedimenten sterk beïnvloed.

2 Limburg Groep

2.1 Stratigrafie

De sedimenten van de Limburg Groep vormen de oudst aangeboorde afzettingen binnen het kaartbladgebied. Zij bestaan uit een dikke, monotone opeenvolging van meestal grijze tot zwart gekleurde, fijnkorrelige siliciklastische sedimenten. Koollagen en plantenresten komen voor in de middelste en bovenste delen. Verschillende fossielhoudende mariene niveaus komen in de basale delen van de groep voor. De groep bevat tevens licht gekleurde massieve zandstenen, en zowel grof- als fijnkorrelige siliciklastische intervallen met primaire roodkleuring, zonder koollagen. Het bovenste deel van de groep laat gewoonlijk een secundaire roodkleuring zien direct onder de Saalische (of Asturische) discordantie. De Limburg Groep is in het kaartbladgebied onderverdeeld in vier subgroepen (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995). Elke subgroep representeert een bepaalde fase van de Laat-Carboon regressieve megasequentie.

De ouderdom van de groep is Namurien tot Westfalen (RGD, 1972, 1992b). Het bestaan van Stefanien afzettingen in het kaartbladgebied is nog niet door boringen aangetoond. Hun bestaan in aangrenzende gebieden in Duitsland wordt echter alom geaccepteerd (Hedeman et al., 1984; Selter, 1990; Tantow, 1993). De Limburg Groep wordt in het gehele kaartbladgebied discordant bedekt door Vroeg-Permische sedimenten van de Boven-Rotliegend Groep.

De Limburg Groep komt in het gehele kaartbladgebied voor en is door erosie in het Laat-Carboon en Vroeg-Perm sterk in dikte gereduceerd. De totale afzettingsdikte van het Carboon is waarschijnlijk meer dan 4500 m geweest. De erosie is gerelateerd aan respectievelijk de Asturische en de Saalische tektonische fasen (fig. 2.1). Hoewel het Carboon in het kaartbladgebied geen primair exploratiedoel is geweest, zijn er meer dan 250 boringen die de Limburg Groep hebben bereikt. Door het staken van veel boringen kort na het bereiken van de Limburg Groep wordt de bepaling van de dikte van de aanwezige formaties bemoeilijkt.

2.2 Geul Subgroep

Er is geen directe informatie over de Geul Subgroep uit het kaartbladgebied beschikbaar. Onderstaande beschrijving is gebaseerd op de 'Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands' (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995).

De eenheid bestaat uit een dikke opeenvolging van overwegend fijnkorrelige siliciklastische afzettingen en bevat geen koollagen. Binnen het kaartbladgebied bestaat de subgroep geheel uit de fijnkorrelige Epen Formatie.

2.2.1 Epen Formatie

Deze formatie is opgebouwd uit een dikke opeenvolging van donkere kleistenen met tussen-geschakelde zeer fijn- tot middel-korrelige zandstenen. Dit gestapelde interval bestaat uit een aantal 50 tot 300 m dikke, vaak naar boven grofkorreliger wordende sequenties. Koollagen komen per definitie bijna niet voor. Schalies en siltstenen, sommige met duidelijke mariene fossielen, domineren de basale en middelste delen van elke opeenvolging.

De basis van de formatie is onvoldoende bekend door de geringe hoeveelheid voldoende diepe boringen. De bovengrens, met de Baarlo Formatie van de Caumer Subgroep, wordt gelegd aan de basis van de eerste prominente koollaag. De ouderdom van de formatie is Namurien tot Vroeg-Westfalen A.

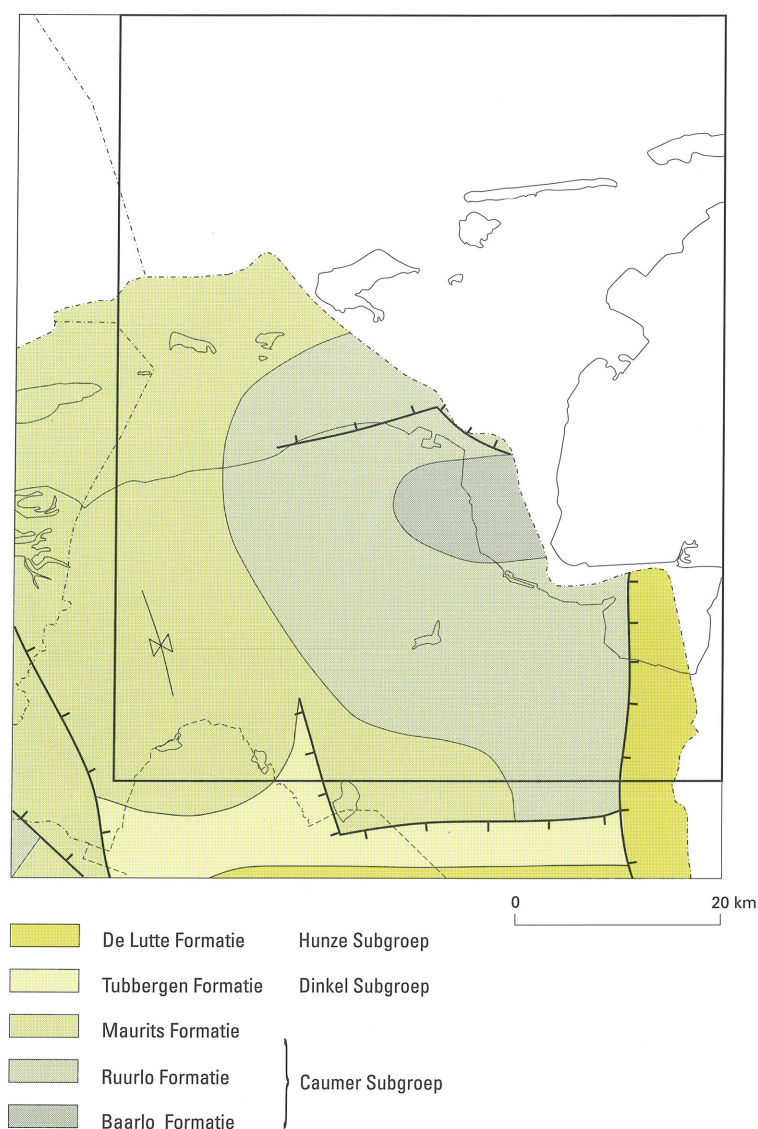
2.3 Caumer Subgroep

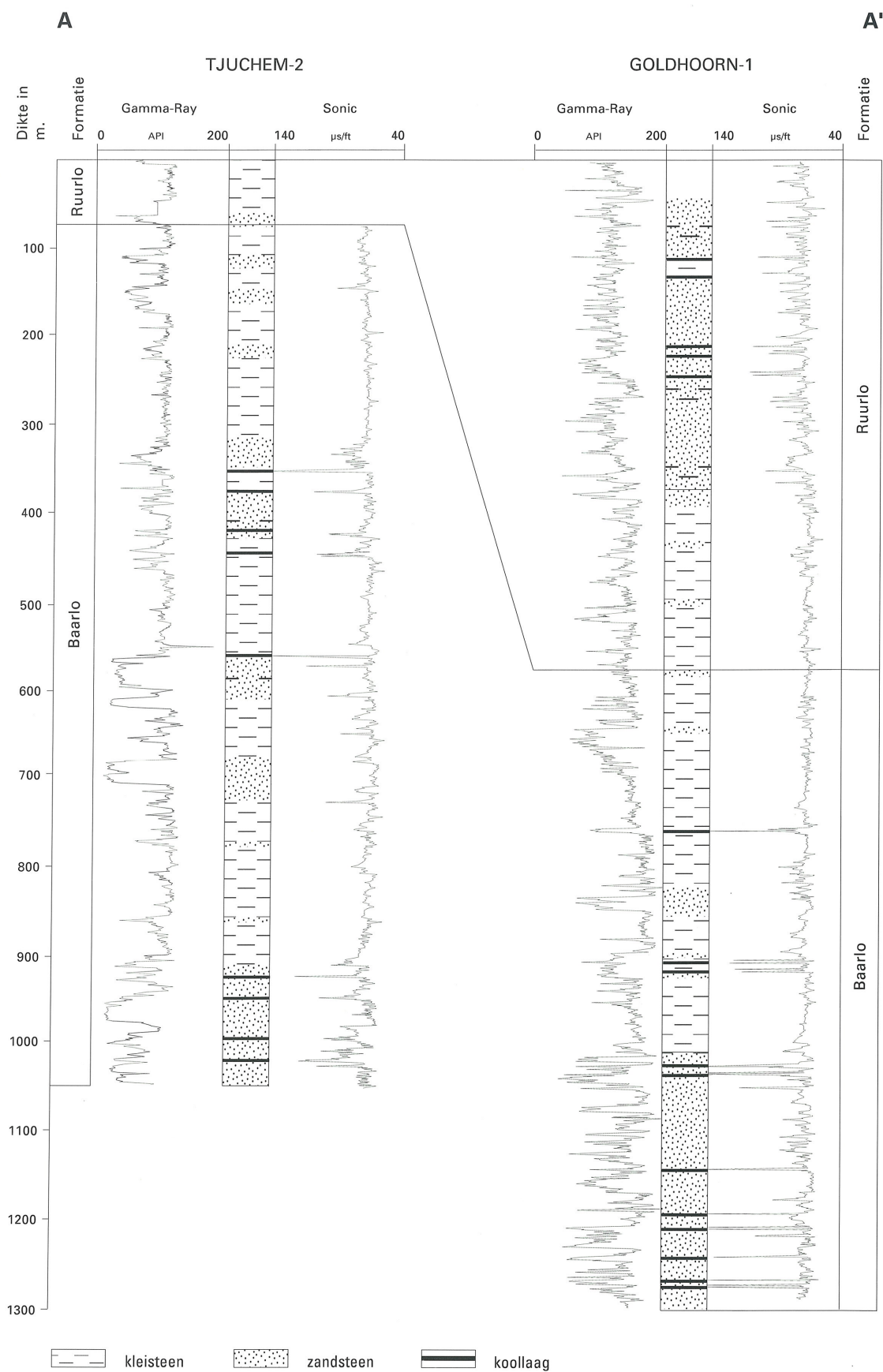
De Caumer Subgroep bestaat uit een dikke opeenvolging van overwegend fijnkorrelige siliciklastische sedimenten en veelvuldig voorkomende koollagen. De ouderdom is Vroeg-Westfalen A tot Laat-Westfalen C. In het kaartbladgebied bestaat de Caumer Groep uit drie formaties, die allen koollagen bevatten.

2.3.1 Baarlo Formatie

De formatie bestaat een dikke opeenvolging van donkere, bruin-grijze of zwarte kleistenen, overgaand in grijze of beige siltstenen en zeer fijne zandstenen. De formatie is opgebouwd uit een groot aantal 20 tot 300 m dikke, naar boven toe grover wordende sequenties (fig. 2.2). De kleistenen aan de basis van enkele sequenties bevatten open-mariene tot brak-water fossielen (goniatieten, Lingula).

Figuur 2.1 Afgedekte geologische kaart van de afzettingen onder de Saalische discordantie. Variatie in ouderdom van de bovenkant van de Limburg Groep en de Varistische plooiassen geven een indicatie van de toenmalige structuren. De kaart is gebaseerd op seismische interpretatie, interpretatie van boorlogs en palynologisch onderzoek (RGD, 1972, 1992a; Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995).





Figuur 2.2 Stratigrafisch profiel A-A' van de Ruurlo en Baarlo

Formaties (Limburg Groep) in de boringen Tjuchem-2 en

Goldhoorn-1. Voor ligging van het profiel zie figuur 1.3.

Fijn- tot middelkorrelige zandstenen beperken zich tot de top van deze sequenties. Hoewel de sequenties goed correleerbaar kunnen zijn, hebben de individuele zandsteenlichamen een beperkte laterale continuïteit. Gewoonlijk komen er minder dan 4 koollagen voor per 100 m sectie. Ze zijn beperkt tot het bovenste deel van de sequenties. Meestal hebben de koollagen een dikte van enkele dm, maar zij kunnen maximaal 2 m worden. In de boring Tjuchem-2 bedraagt de dikte van de Formatie van Baarlo meer dan 1000 m (fig. 2.2).

De Baarlo Formatie is in het gehele kaartbladgebied aanwezig en is van Vroeg-Westfalen A ouderdom (RGD, 1972). Het basale contact met de formatie van Epen is gelegd aan de basis van de onderste koollaag. In een continue sectie is de overgang met de Ruurlo Formatie gedefinieerd als het niveau waar dikke, naar boven toe grofkorreliger wordende sequenties veranderen in zowel fijn- als grofkorrelig wordende cycli.

2.3.2 Ruurlo Formatie

De Ruurlo Formatie bestaat uit een opeenvolging van donkergrijze of zwarte siltige kleistenen met een variërend aantal koollagen (fig. 2.2), en grijze of lichtgele fijnkorrelige, kleiige of siltige zandstenen (tot 5 m dik). De formatie wordt gekarakteriseerd door een patroon van gestapelde zandstenen met zowel fijner als grover wordende sequenties. De sequenties zijn gemiddelde ca. 50 m dik. Zandstenen zijn ontwikkeld in kleine geulen en komen ook voor als dunne lagen met redelijke laterale continuïteit. Koollagen, tot 2 m dik, komen veel voor, maar met een lateraal sterk wisselende frequentie.

De formatie ligt concordant op de Baarlo Formatie. De top van de formatie wordt gemarkeerd door een abrupte overgang naar de door kleistenen en koollagen gedomineerde Maurits Formatie. De formatie is in het gehele kaartbladgebied afgezet, maar is op het Groningen Hoog geheel of gedeeltelijk geërodeerd (fig. 2.1). In de boring Goldhoorn-1 bedraagt de minimale dikte 550 m (fig. 2.2). De Ruurlo Formatie is van Laat-Westfalen A tot Vroeg-Westfalen B ouderdom.

2.3.3 Maurits Formatie

De Maurits Formatie bestaat voornamelijk uit lichtgrijze kleistenen met relatief veel koollagen en een veel geringer aantal grijze en lichtgele, zeer fijne tot grofkorrelige kleiige zandstenen. Sommige donkergrijze kleistenen bevatten brak-water fossielen.

Het contact van de Maurits Formatie met de eronder liggende Ruurlo Formatie is duidelijk bij een zandige ontwikkeling van de Ruurlo Formatie. In een kleiige ontwikkeling is de overgang vaak moeilijk te vinden door de sterk gelijkende lithologie. In een complete opeenvolging komt de top van de Maurits Formatie overeen met de top van de Caumer Subgroep en wordt deze gelegd bij de eerste dikke zandsteenlaag van de Tubbergen Formatie (fig. 2.3). De Maurits Formatie is aanwezig in het Eems Diep en de Lauwerszee Trog waar ze een dikte heeft van 150 m. De ouderdom van de formatie is Laat-Westfalen B tot Laat-Westfalen C. In figuur 2.3 is het Aegir mariene niveau te herkennen, op de Westfalen B - Westfalen C grens.

2.4 Dinkel Subgroep

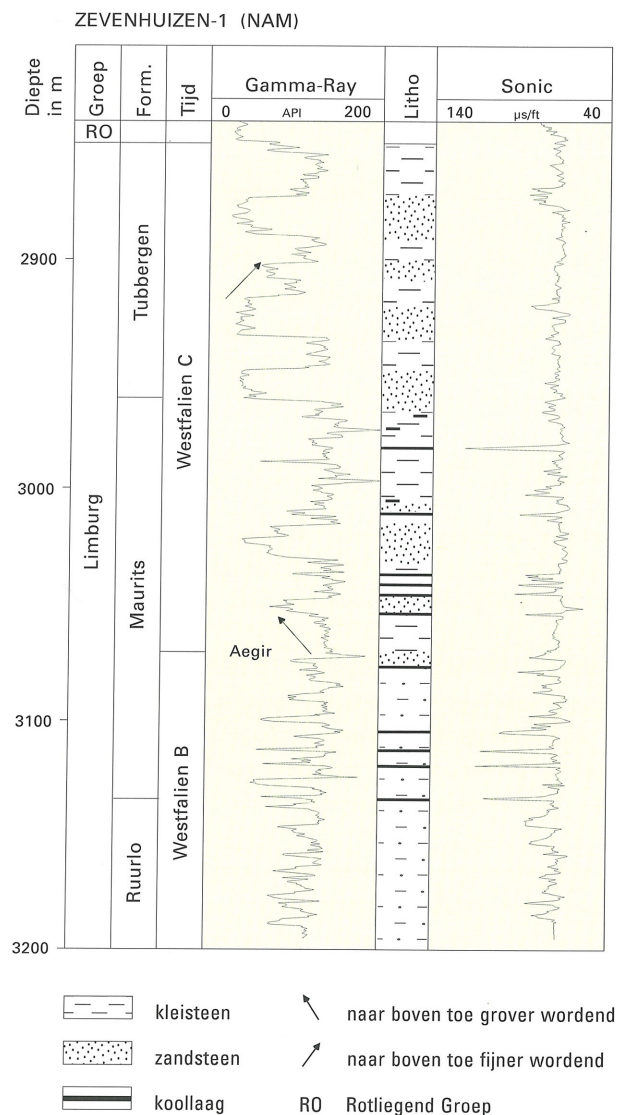
In het kaartbladgebied bestaat de Dinkel Subgroep geheel uit de Tubbergen Formatie, die slechts voorkomt in het zuidwestelijke deel van het kaartbladgebied en in het Eems Diep.

2.4.1 Tubbergen Formatie

Deze formatie is een opeenvolging van overwegend grijze of witte, maar ook roze en rode zandstenen van variërende dikte, die worden afgewisseld door grijze en roodbruine kleistenen, en enkele koollagen. De zandsteen intervallen maken 30 tot 70% uit van de opeenvolging (fig. 2.3). De zanden zijn fijn tot zeer grofkorrelig, en bevatten soms kleine rolstenen. De dikte van de Tubbergen Formatie bedraagt ca. 150 m in de boring Norg-Zuid-1 (direct ten zuiden van het kaartblad).

De basis van de Tubbergen Formatie wordt gemarkeerd door het eerste voorkomen van dikgebankte zandstenen. De formatie wordt bedekt door de, door kleistenen gedomineerde, De Lutte Formatie van de Hunze Subgroep. De ouderdom van de formatie is Laat-Westfalien C tot Vroeg-Westfalien D.

Figuur 2.3 Logbeeld van de Ruurlo, Maurits en Tubbergen Formaties (Limburg Groep) in de boring Zevenhuizen-1.



In het kaartbladgebied is de formatie aanwezig in het zuidelijkste deel van de Lauwerszee Trog, ten zuiden van het Groningen Hoog en in het Eems Diep. In het Nederlandse deel van het Eems Diep is de Tubbergen Formatie nooit aangeboord.

2.5 Hunze Subgroep

In het kaartbladgebied bestaat de Hunze Subgroep slechts uit de De Lutte Formatie. Zij komt slechts voor in het Eems Diep.

2.5.1 De Lutte Formatie

Opeenvolging van overwegend roodbruine en groengrijze, siltige tot zeer fijn-zandige kleistenen. De formatie bestaat naast de kleistenen ook voor een klein gedeelte uit lichtgrijze, witte, paarse of rode zandstenen die goed correleerbaar zijn. De zandstenen zijn fijn- tot middelkorrelig met intercallaties van zeer grofkorrelige zandsteen en conglomeraten. Koollagen komen nagenoeg niet voor.

De ouderdom van de overgang Tubbergen Formatie - De Lutte Formatie varieert van Laat-Westfalen C/Vroeg-Westfalen D in de bekkens zoals het Eems Diep, tot Laat-Westfalen D aan de randen van de bekkens. Het voorkomen van Stefanien in het Eems Diep is nooit bevestigd, maar wordt aangenomen op basis van log-correlaties met Duitsland (Hedeman et al., 1984; Selter, 1990; Tantow, 1993). Ten zuiden van het Groningen Hoog kan de dikte van de De Lutte Formatie oplopen tot ca. 300 m.

De De Lutte Formatie ligt concordant op de bovenste massieve zandstenen van de Tubbergen Formatie en is aan de top aangesneden door de Saalische discordantie. De formatie wordt discordant bedekt door de Boven-Rotliegend Groep.

2.6 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

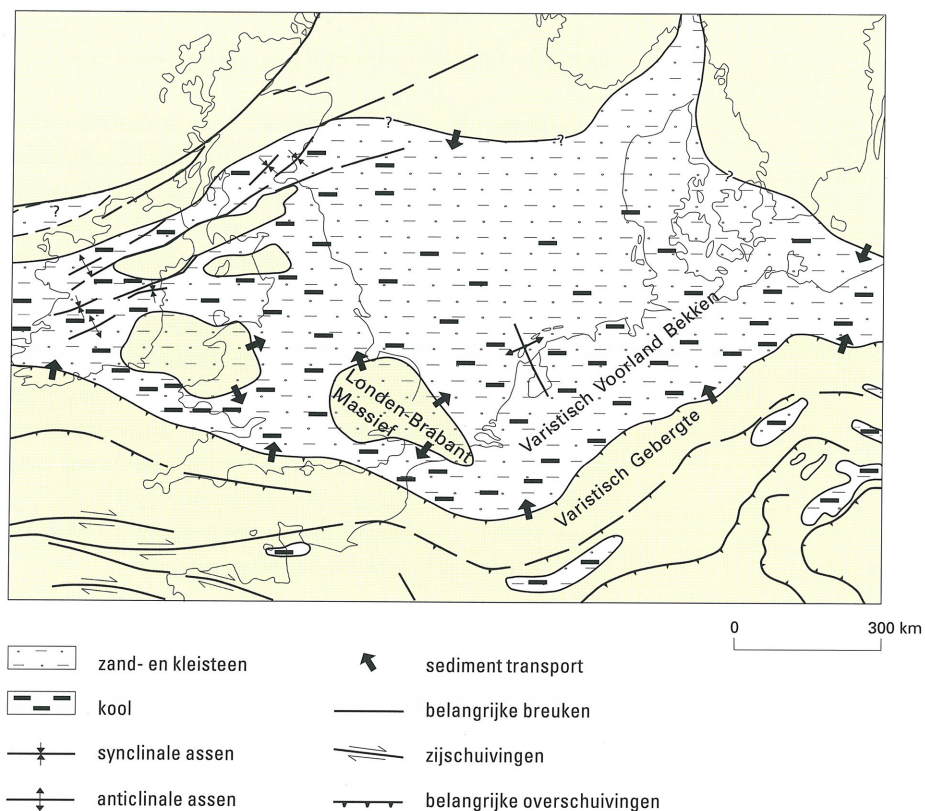
De afzettingen van de Limburg Groep weerspiegelen een regressieve deltaïsche vulling van een voorlandbekken (Van Wijhe & Bless, 1974; Ramsbottom, 1979; Guion & Fielding, 1988). Dit bekken was O-W georiënteerd en bestreek het gebied van Engeland tot Polen (fig. 2.4). Het ontwikkelde zich tijdens de vorming van het Varistische Orogeen (zie hoofdstuk 11). De dikke opeenvolging kent slechts graduele overgangen van de verschillende facies, waarbij de bekkendaling ongeveer even groot was als de sedimentatiesnelheid. Het brongebied van de sedimenten binnen het kaartbladgebied was het Varistische gebergte. Het basale deel van de opeenvolging (Geul Subgroep) bestaat uit mariene, lacustriene en deltaïsche afzettingen. Het middelste deel (Caumer Subgroep) is het vervolg van de regressieve megasequentie in het Laat-Carboon en wordt gekenmerkt door de vervanging van dominante pro-delta afzettingen door deltavlake- en rivierafzettingen. Op de deltavlake ontwikkelden zich tevens koolafzettingen in moerassen. In het bovenste deel (Dinkel en Hunze Subgroep) zijn de deltaïsche afzettingen stapsgewijs vervangen door grofkorrelige rivierafzettingen. De plotselinge erosieve insnijding van grote hoeveelheden grofkorrelig materiaal en de kleine interne discordanties duiden op tektonische opheffing van het achterland.

Vol-mariene omstandigheden tijdens afzettingen van mariene niveau's duurden kort, maar kwamen frequent voor in het onderste deel van de Limburg Groep. In het middelste deel komen zij minder vaak voor terwijl zij in het bovenste deel geheel afwezig zijn. Een consistente periodieke kracht achter de cycliciteit gedurende het Carboon waren de glaciaties. Deze hadden invloed op het zeespiegelniveau, de erosiebasis en het klimaat (Bless & Winkler Prins, 1972). Daarnaast speelden non-periodieke effecten, zoals variabele tektonische activiteit, bekkendaling en het veranderen van sedimentatie-

patronen (bv. het plotselinge verlaten van de meandergeul en compactie) een belangrijke rol (Read & Dean, 1973; Guion & Fielding, 1988; DeVries Klein & Kupperman, 1992).

Sedimenten, flora en fauna van het Namurien en het Westfalen A tot C wijzen op een tropisch en vochtig klimaat zonder duidelijke seizoenen-invloeden. Gedurende het Laat-Westfalen C en D, en het Stefanien werd het klimaat droger (Hedeman et al., 1984; Van der Zwan et al., 1993). De rode kleur van de sedimenten, de kalkhoudende bodems en de spaarzame vegetatie wijzen op een meer seizoenen-ge-stuurd, tropisch semi-aride klimaat.

Figuur 2.4 Paleogeografische kaart van Noordwest-Europa tijdens het Carboon (naar Ziegler, 1990).



3 Boven-Rotliegend Groep

3.1 Stratigrafie

De Boven-Rotliegend Groep bestaat uit klastische sedimenten en evaporieten. De sedimenten vertonen in het algemeen een karakteristieke rode of roodbruine kleur en werden onder continentale omstandigheden afgezet. De groep bestaat uit twee lateraal in elkaar overgaande formaties; de Slochteren Formatie in het zuiden en de Silverpit Formatie in het noorden (fig. 3.1). In het gebied waar beide formaties voorkomen worden ze gesplitst in laagpakketten. Van boven naar beneden zijn dit het Ten Boer Laagpakket, het Boven-Slochteren Laagpakket, het Ameland Laagpakket en het Onder-Slochteren Laagpakket. De Slochteren Formatie is de proximaal afgezette fluviatiele zandsteen, terwijl de Silverpit Formatie het distale lacustriene equivalent is. De ouderdom van de groep is Vroeg-Perm.

De dikte van de Boven-Rotliegend Groep neemt toe van 100 m in het zuidoosten tot 400 m in het noordwesten van het kaartbladgebied. Er is ook een verdikking in de Lauwerszee Trog ten opzichte van het Groningen Hoog waar te nemen (fig. 3.2).

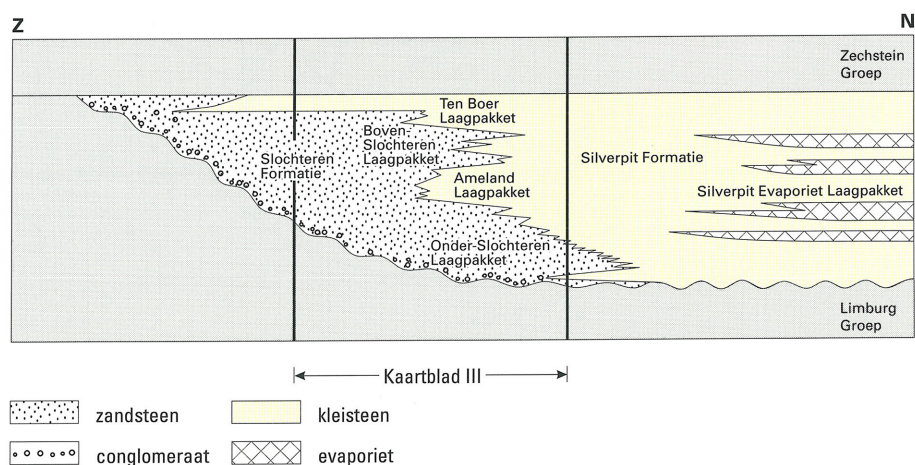
Op de dieptekaart van de basis van de Boven-Rotliegend Groep zijn de Lauwerszee Trog en het Groningen Hoog duidelijk te herkennen (Kaart 1). Het Groningen Hoog helt naar het noorden waarbij de diepte van de basis van de Boven-Rotliegend Groep toe neemt van 2750 m tot 3000 m. Een snelle toename van de diepte is zichtbaar bij de overgang naar de Lauwerszee Trog. In de trog varieert de diepte van 3500 m tot ruim 4200 m rond Rottumerplaat. Ook aan de oostzijde van het Groningen Hoog, in het Eems Diep, neemt de diepte snel toe tot ruim 3900 m.

De Boven-Rotliegend Groep ligt discordant op de afzettingen van de Limburg Groep. Deze discordantie is het gevolg van de Saalische tektonische fase. Direct op de Boven-Rotliegend Groep volgen concordant de afzettingen van de Laat-Permische Zechstein Groep.

3.1.1 Slochteren Formatie

De Slochteren Formatie bestaat in het zuiden uit massieve zandstenen met conglomeraat-inschakelingen. In het noorden vindt men alleen aan de basis nog lokaal conglomeraten, terwijl het aantal kleisteen-inschakelingen toeneemt. In het noordelijk deel vervingert de Slochteren Formatie met de Silverpit Formatie. De Slochteren Formatie wordt daar onderverdeeld in het Onder-Slochteren Laagpakket en het Boven-Slochteren Laagpakket (fig. 3.1).

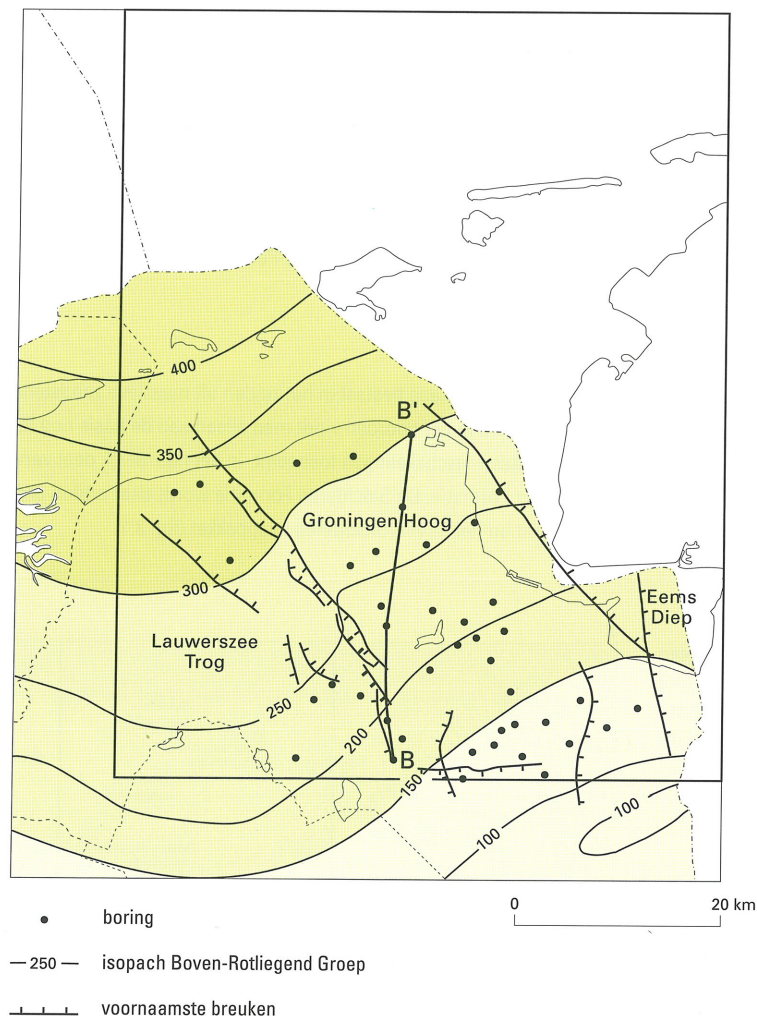
Figuur 3.1 Lithostratigrafisch diagram van de Boven-Rotliegend Groep waarin de laterale overgang van de Slochteren Formatie naar de Silverpit Formatie geschematiseerd is. Door middel van het ingezette kader wordt de positie van het kaartblad aangegeven.

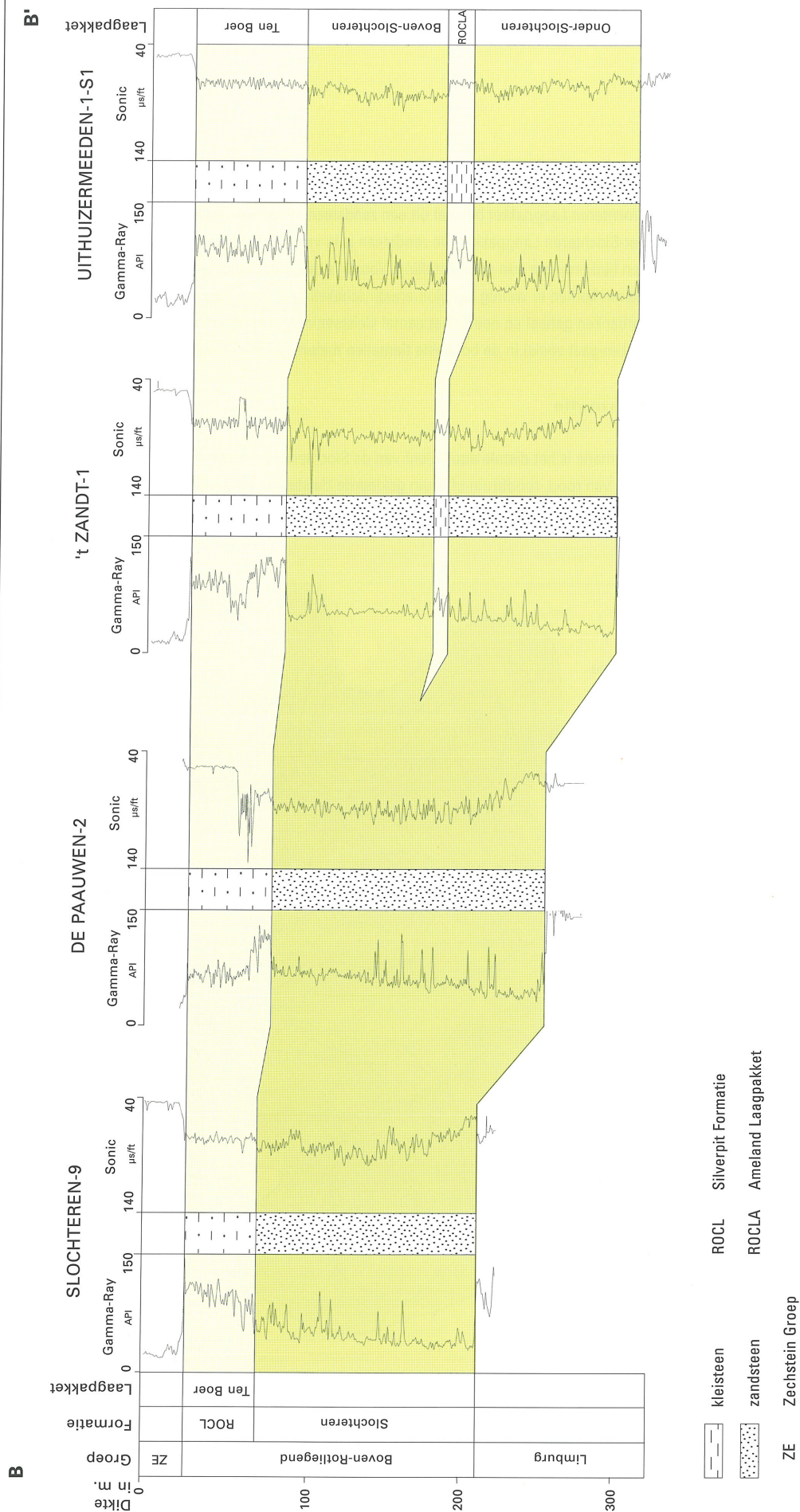


De dikte van de Slochteren Formatie varieert van 95 m in het zuidoosten tot een maximum van 235 m in het noordwesten van het gebied. Ten noorden van het kaartbladgebied wordt de formatie snel dunner (fig. 3.3). In de boring Schiermonnikoog-Zee-1, gelegen ten noordwesten van het kaartbladgebied, is de formatie nog maar 72 m dik.

Het *Onder-Slochteren Laagpakket* is hoofdzakelijk opgebouwd uit zandsteenbanken met ingeschakelde conglomeraat- en klesteenlaagjes. De grijze en licht- tot donkerrode zandsteenbanken bestaan uit grof tot zeer fijn zand met een variërende sortering en matige afronding. Vaak worden hierin kleinschalige scheve gelaagdheid, trogvormige scheve gelaagdheid of parallele en golvende laminaties waargenomen. De basis van de formatie wordt gevormd door banken bestaande uit fijn- tot grofkorrelige zandsteen, conglomeratische zandsteen en conglomeraat, die meestal een naar boven toe afnemende korrelgrootte tonen. In het conglomeraat komen kiezels met een grootte tot 4 cm voor. Zij bestaan uit rolkwarts, verkiezelde klesteen, verkiezelde kooldeeltjes of harde kleilensjes en brokjes. Plaatselijk komen dolomitische en kalkhoudende klesteen en anhydritische dolomiet voor. De klesteenbanken zijn paarsrood en vaak anhydritisch. De bankdikte varieert van enkele centimeters tot enkele meters.

Figuur 3.2 Diktekaart van de Boven-Rotliegend Groep. De kaart is gebaseerd op boorgegevens en seismische interpretatie. B-B' geeft de locatie van het in figuur 3.3 getoonde lithostratigrafische profiel.





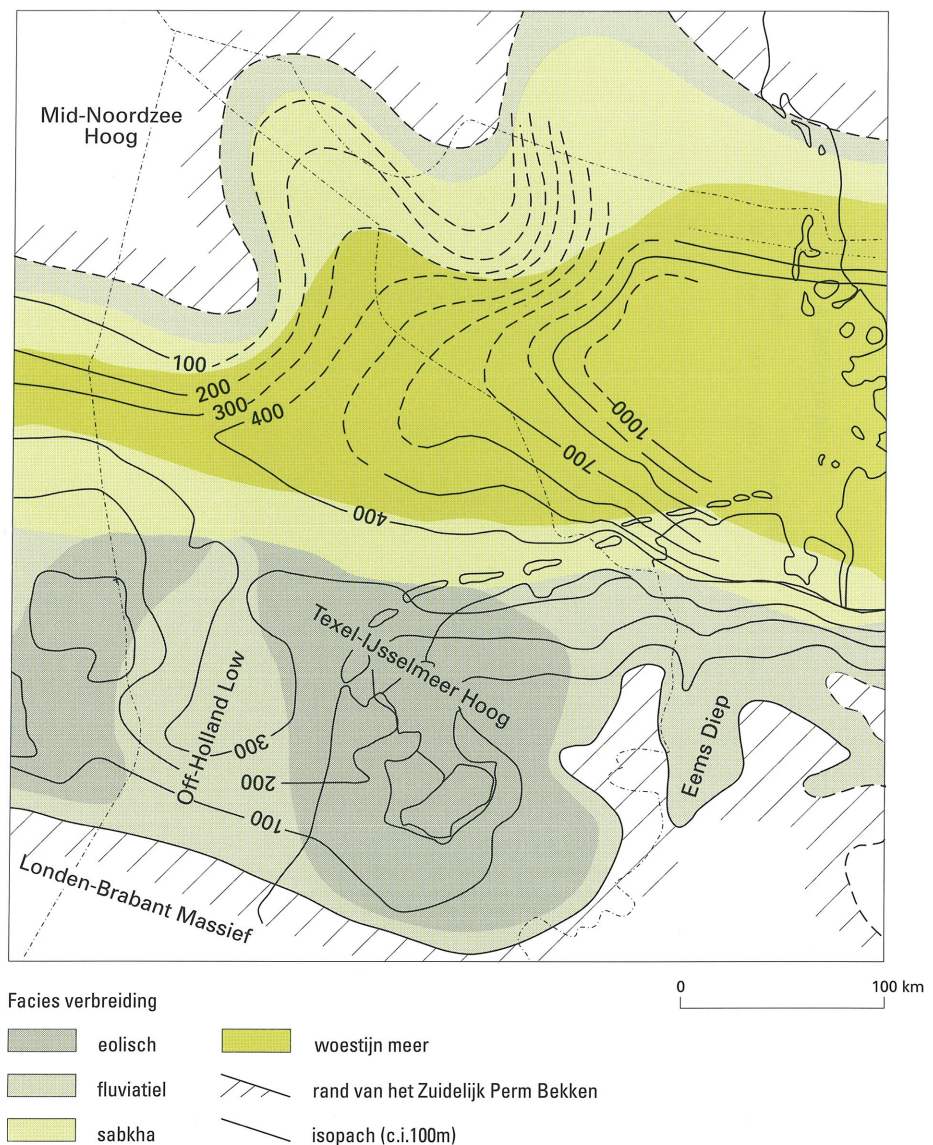
Figuur 3.3 Stratigrafisch profiel B-B' van de Boven-Rotliegend Groep van de boringen Slochteren-9, De Pauwen-2, 't Zand-1, en Uithuizermeeden-1-S1. Het profiel toont van zuid naar noord de verdikking van de Boven-Rotliegend Groep. In de boringen ten noorden van de boring De Pauwen-2 komt de Ameland ingeschakeld tussen de Onder-Slochteren en Boven-Slochteren voor.

Het *Boven-Slochteren Laagpakket* bestaat uit een zandsteenpakket dat lithologisch veelal overeenkomt met het *Onder-Slochteren Laagpakket*. De zandsteen is in vergelijking met de *Onder-Slochteren* homogener en fijnkorreliger van samenstelling. Voorts is de afronding beter. In tegenstelling tot de *Onder-Slochteren* komen er weinig conglomeratinschakelingen voor. Naar de top toe verdwijnen de conglomeraatbanken geheel en neemt het aantal kleisteeninschakelingen toe. De rode kleur van de zandsteenbanken gaat veelal in de bovenste tientallen meters geleidelijk over naar beige.

3.1.2 Silverpit Formatie

De Silverpit Formatie is het distale equivalent van de Slochteren Formatie en bestaat hoofdzakelijk uit een afwisseling van rood, roodbruin of bruin gekleurde kleistenen, siltige kleistenen en zandsteeninschakelingen. Plaatselijk bevat de formatie inschakelingen van dunne dolomiet- en anhydrietlaagjes.

Figuur 3.4 Paleogeografische kaart met de faciesverbreiding van een deel van het Zuidelijk Perm Bekken tijdens het Laat-Perm. Het kaartbladgebied, gesitueerd in het zuidelijk deel van het bekken, bevond zich voornamelijk binnen het bereik van de (overheersend) fluviatiele afzettingen. Ten zuiden van het kaartbladgebied lag het Varistische gebergte, het bron-gebied van de klastische sedimen-ten. Direct ten noorden van het kaartbladgebied bevond zich een sabkha die bekkenwaarts overging in een woestijnmeer (naar Van Wijhe et al., 1980).



In het kaartbladgebied vervingert de Slochteren Formatie met de Silverpit Formatie. De afzonderlijke kleisteen tongen vormen van oud naar jong het Ameland en het Ten Boer Laagpakket (fig. 3.1).

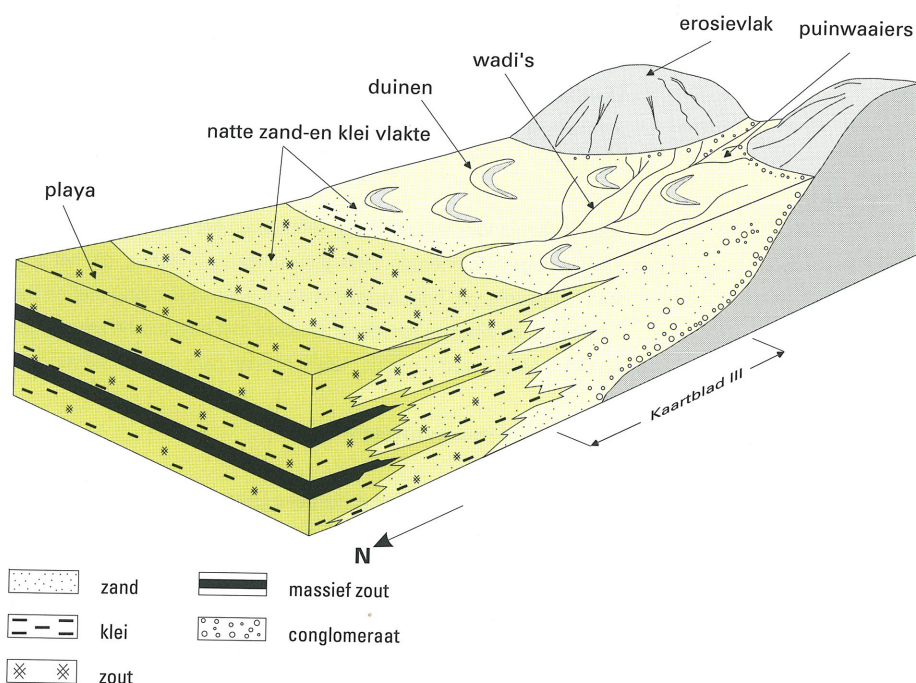
Het *Ameland Laagpakket* komt voor in het noordelijke deel van het kaartblad en splitst de Slochteren Formatie in een Onder- en Boven-Slochteren Laagpakket. Doordat in het laagpakket naast kleisteen ook dunne siltsteen- en fijne zandsteen-inschakelingen voorkomen, zijn de onder- en bovengrens vaak gradueel. De maximaal aangeboorde dikte in het kaartbladgebied bedraagt 20 m. Deze dikte neemt naar het noorden snel toe. Onder Schiermonnikoog bedraagt de dikte reeds 208 meter.

Het *Ten Boer Laagpakket* vormt in het kaartbladgebied het bovenste deel van de Boven-Rotliegend Groep. Het laagpakket bestaat uit een afwisseling van silt- en kleisteen met een enkele zandsteenbank. Met name in de dunnere kleisteenlagen kunnen plaatselijk anhydrietknolletjes voorkomen. De Ten Boer wordt concordant bedekt door de Koperschalie van de Zechstein Groep. De dikte neemt in noordelijke richting toe, van ongeveer 30 m in het zuiden tot meer dan 75 m in het noorden van het kaartblad-gebied (fig. 3.3). In het zuiden wordt deze eenheid zandiger om uiteindelijk ten zuiden van het kaartblad lateraal over te gaan in de Slochteren Formatie (fig. 3.1).

3.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De Boven-Rotliegend Groep is onder continentale omstandigheden afgezet in het intra-cratonische Zuidelijk Perm Bekken (fig. 3.4). De sedimenten zijn voornamelijk afkomstig van uitlopers van het Varistisch gebergte, dat de zuidelijke begrenzing vormde van het Zuidelijk Perm Bekken. Aan de voet van het Varistisch gebergte ontstonden puinwaaiers met een stroomvlakte (Stäuble & Milius, 1970; Van Wijhe et al., 1980). Onder invloed van het aride klimaat veranderde het gebied ten noorden hiervan in een playa of sabkha, een laag gelegen woestijngebied, met in het centrale deel een, soms droogvallend, (playa)meer. Het kaartblad vertegenwoordigt paleogeografisch grofweg de zone tussen

Figuur 3.5 Schematische weergave van het afzettingsmilieu van de sedimenten van de Boven-Rotliegend Groep gedurende het Laat-Perm.



de puinwaaiers en het meer, bestaande uit een stroomvlakte met vlechtende rivier- en sheetflood-afzettingen (massale overstromingsafzetting; fig. 3.5).

Onder invloed van het stijgen van het water in het playameer, door het optreden van natte perioden, breidden de lacustriene afzettingen zich uit ten koste van de fluviatiele afzettingen. Twee belangrijke perioden van hoog water hebben zodoende geresulteerd in de, zich ver zuidelijk uitstreckende, kleisteensequenties van de Ameland en Ten Boer Laagpakketten. De wat grovere en minder goed gesorteerde zandsteenbanken, conglomeraat- en kleisteeninschakelingen van de Slochteren Formatie worden geïnterpreteerd als afzettingen in wadis of verwilderde rivieren. Goed gesorteerde zandsteenbanken worden over het algemeen beschreven als eolische sedimenten, afgezet als dekzanden of brede duinsystemen tussen de wadi's. Fluviatiele afzettingen domineren binnen het kaartbladgebied. Eolische afzettingen zijn waarschijnlijk maar zeer beperkt aanwezig (Van Wijhe et al., 1980). In het zuiden van het kaartbladgebied komen zij in het geheel niet voor.

De zandsteenbanken die voorkomen in de lacustriene sedimenten van de Silverpit Formatie worden geïnterpreteerd als fluviatiele sheetfloods, afgezet in een meer (Van Rossum, 1978). De ingeschakelde anhydrietknolletjes zijn ontstaan in periodes dat het meer (gedeeltelijk) droog viel. Dit geeft aan dat de Ameland en de Ten Boer zijn afgezet in een playa-meer met fluctuerende waterspiegel.

De verschuivingen van de faciesgrenzen gedurende de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep zijn een gevolg van wisselingen in het klimaat en (regionale) tektonische bewegingen. Het samenspel van deze twee factoren veroorzaakte fluctuaties in de (grond)waterspiegel en in sedimentaanvoer en -type. Deze fluctuaties worden gereflecteerd door de afwisseling van zandsteenbanken en klei-inschakelingen en van kleisteenbanken en siltsteen in respectievelijk de Slochteren Formatie en de Silverpit Formatie.

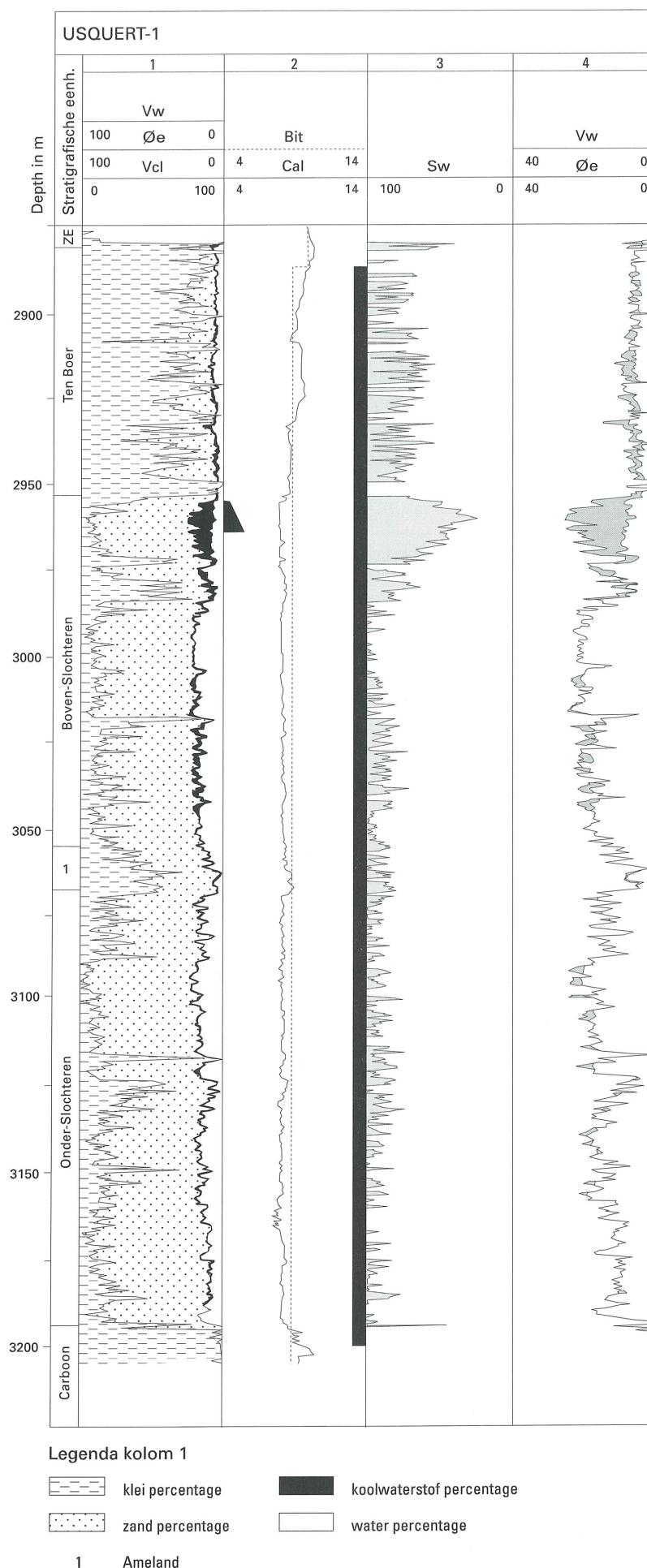
De in noordelijke richting toenemende dikte van de Boven-Rotliegend Groep is het gevolg van sterkere daling in het centrale deel van het bekken. Het dikteverschil tussen het Groningen Hoog en de Lauwerszee Trog lijkt het gevolg te zijn van synsedimentaire bewegingen langs de in dit gebied NW-ZO strekkende breuken (Kaart 1 & fig. 3.3). Ook de voornamelijk fluviatiele afzettingen in het Eems Diep zijn te relateren aan het zich synsedimentair manifesteren van deze depressie. Zuidelijk van het kaartbladgebied treffen we de uitlopers van het Varistisch gebergte aan. De erosie die hier plaatsvond leverde het sediment dat binnen het kaartbladgebied wordt afgezet, grof in het zuiden, fijn in het noorden.

Aan het begin van het Laat-Perm veranderde het Zuidelijk Perm Bekken ten gevolge van een transgressie in een grote binnenzee. Deze plotselinge verandering, die het begin van de Zechstein markeert, was het gevolg van het ontstaan van een open verbinding met de Barentsz Zee. Slenkvorming tussen Groenland en Noorwegen, gecombineerd met eustatische zeespiegelstijging door het afsmelten van de Gondwana ijskap (Glennie, 1983), maakte deze verbinding mogelijk.

3.3 Petrofysische evaluatie

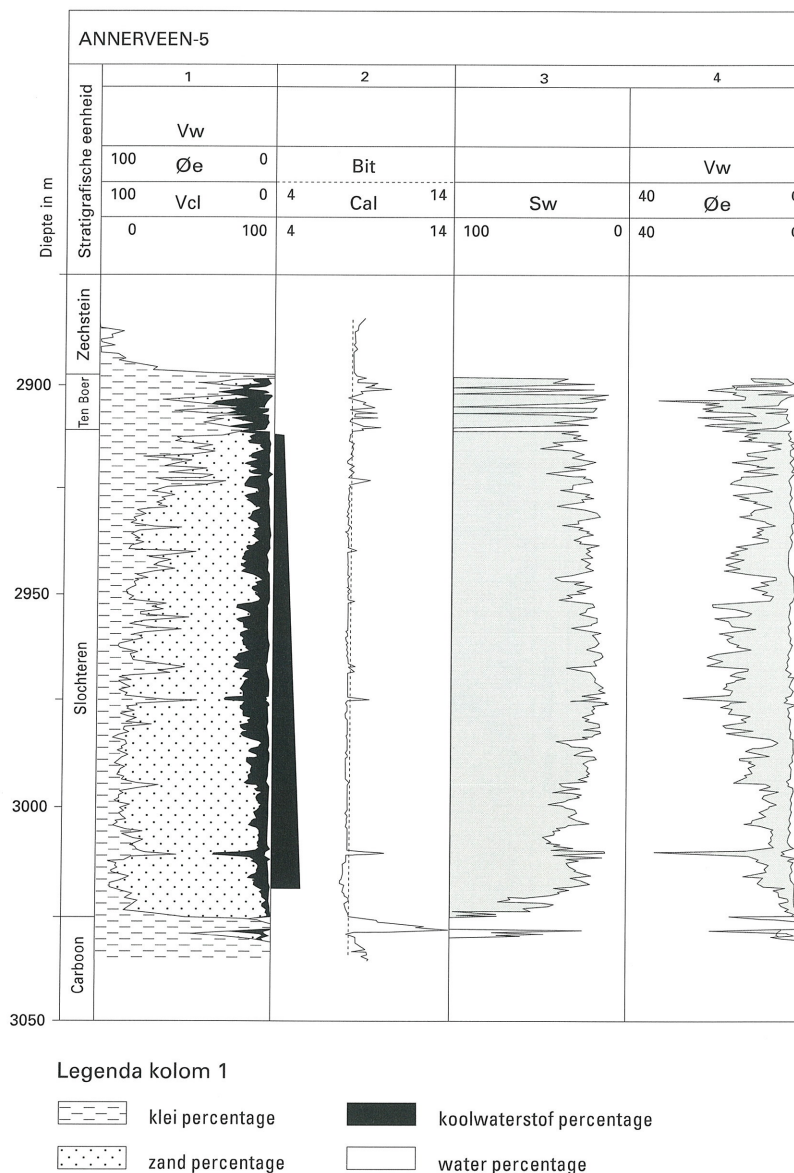
De zandsteen van de Boven-Rotliegend Groep vormt het reservoirgesteente van het Groningen gasveld en van de velden in de directe omgeving ervan. Het Groningen gasveld beslaat een groot deel van het kaartbladgebied (fig. 1.2). Het is het grootste gasveld van Europa met een initieel gasvolume van 2956 miljard m³ (fig. 1.4). De koollagen van het onderliggende Carboon vormen het gasmoedergesteente en het impermeabele Zechstein zout sluit het reservoir aan de bovenkant. Het Groningen gasveld bestaat uit een in noordwestelijke richting hellende, NW-ZO strekkende horststructuur die overal, behalve in het noorden, wordt begrensd door grote breuken.

Figuur 3.6a Petrofysische evaluatie van de Boven-Rotliegend Groep in de boring Usquert-1. Kolom 1: kleigehalte Vcl, effectieve porositeit ϕ_e en porievolume water Vw alle in procenten. Het kleigehalte werd bepaald m.b.v. de gamma-ray log. De effectieve porositeit werd verkregen met gebruikmaking van de sonic logs na correctie voor het kleigehalte. Kolom 2: boorgat diameter (Cal) en boorbeiteldiameter (Bit), beide in inches; bovendien zijn de geteste intervallen (appendix D) weergegeven d.m.v. een trapezium en het gekernde interval d.m.v. een zwarte balk. Kolom 3: de watersaturatie Sw in procenten. Voor de bepaling van de watersaturatie werd de Indonesia-formule gebruikt, die geschikt is voor kleiige formaties (Fertl, 1987). Kolom 4: effectieve porositeit ϕ_e (linker curve) en het volume water in de poriën Vw (rechter curve), beide in procenten. In de linker kolom zijn de formatiegrenzen aangegeven. De diepte is de werkelijke diepte.



Van 20 boringen uit het kaartbladgebied en directe omgeving zijn de petrofysische eigenschappen van het reservoirgesteente geëvalueerd. In appendix C zijn reservoirsommities van porositeitswaarden gegeven van de verschillende lithostratigrafische eenheden: de Boven-Rotliegend Groep, de Slochteren Formatie, het Boven-Slochteren en het Onder-Slochteren Laagpakket. Veel van de aangeboorde zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep zijn gasvoerend (appendix D). Als voorbeelden van log-evaluaties van het Boven-Rotliegend reservoirtraject worden in figuur 3.6 de resultaten getoond voor de boringen Usquert-1 en Annerveen-5. In de boring Usquert-1 is het bovenste gedeelte van de Boven-Slochteren en de Ten Boer gasvoerend (fig. 3.6a). Representatief voor het Groningen gasveld is de compleet met gas gevulde Slochteren Formatie van de boring Annerveen-5 (fig. 3.6b).

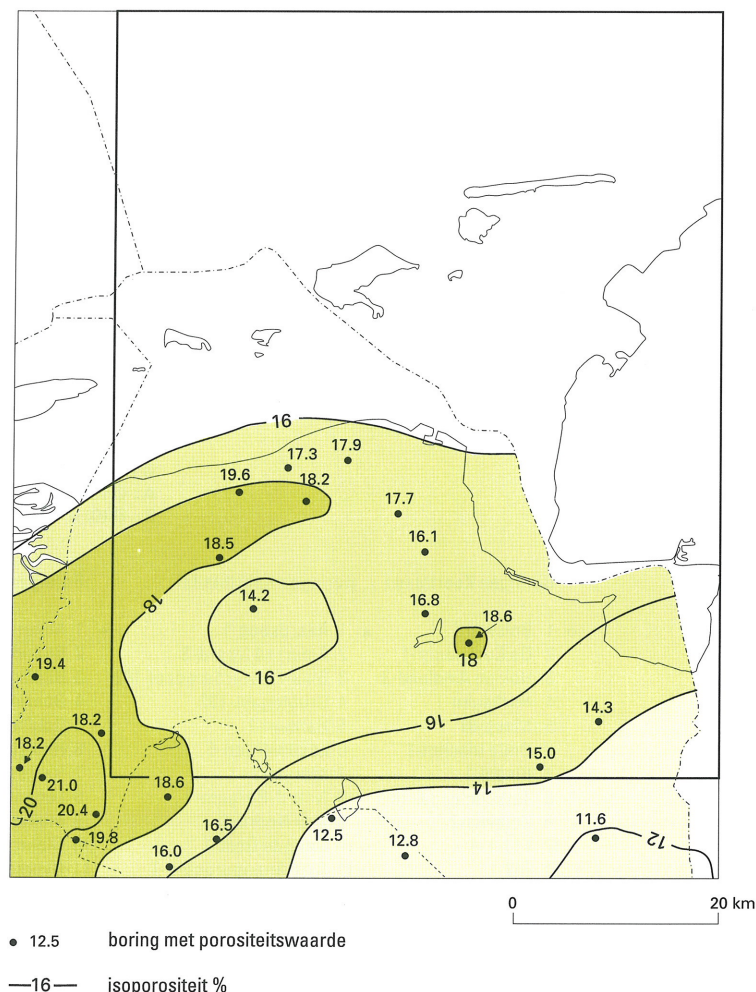
Figuur 3.6b Petrofysische evaluatie van de boring Annerveen-5. Voor uitleg van de figuur zie figuur 3.6a.



In figuur 3.7 is de verdeling van de gemiddelde effectieve porositeit ($\bar{\phi}_{em}$) van de Boven-Rotliegend Groep in het kaartbladgebied weergegeven. Deze gemiddelde effectieve porositeit varieert van 13 tot 20%. Zij is het hoogst in het centrum van het kaartbladgebied en neemt naar het noordwesten en het zuiden af. Van Rossum (1978) verklaart dit door de toenemende kleifractie naar het noorden en de slechtere sortering naar het zuiden. De reservoirpermeabiliteit bereikt waarden tot 600 mD.

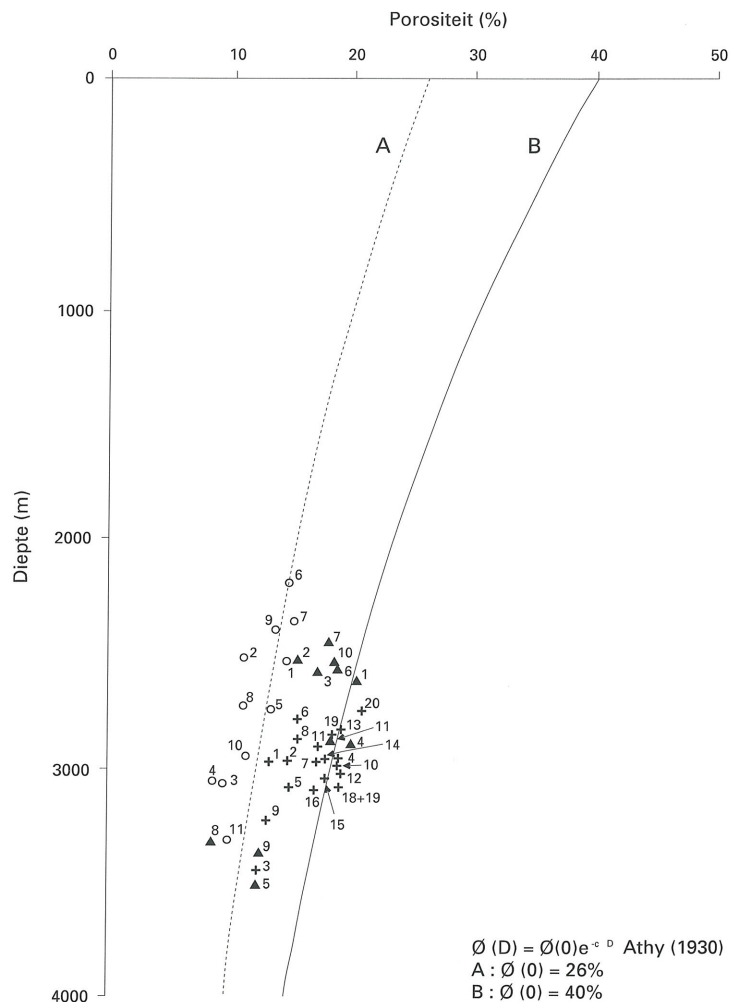
In figuur 3.8 is de porositeit-diepte relatie weergegeven van de petrofysisch geëvalueerde boringen van kaartblad I, II en III. In tegenstelling tot kaartblad I en II liggen porositeiten van de Boven-Rotliegend Groep op kaartblad III geconcentreerd op een diepte van ca. 3000 m met een $\bar{\phi}_{em}$ van ca. 20%. Compactiecurven volgens Athy (1930) staan in de figuur gegeven voor zandsteen met een oppervlakteporositeit van 26% (wadi's) en van 40% (top van eolische afzettingen). Deze waarden zijn door Nagtegaal (1979) gedefinieerd voor de Boven-Rotliegend Groep in de Zuidelijke Noordzee. Hoewel er relatief weinig eolische afzettingen op het kaartblad voorkomen vallen de meeste metingen toch rond de laatste curve. De gemiddelde effectieve porositeiten van de Boven-Rotliegend reservoir-trajecten zijn in kaartbladgebied dan ook hoger dan men op grond van de huidige begravingsdiepte zou mogen verwachten (fig. 3.8). In het kader van deze regionale kartering kan op deze problematiek niet verder worden ingegaan.

Figuur 3.7 Schematische contourkaart van de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit $\bar{\phi}_{em}$ van de Boven-Rotliegend Groep (appendix C).



Studies van de begravingsgeschiedenis wijzen uit dat de Boven-Rotliegend Groep in het kaartblad-gebied in het verleden nooit dieper begraven is geweest dan nu het geval is (RGD, 1994; Van Wijhe et al., 1980; Perrot & Van der Poel, 1987).

Figuur 3.8 Porositeit versus diepte plot voor de Boven-Rotliegend Groep voor de geëvalueerde relevante boringen op de kaartbladen I, II en III. Curve A is de compactiecurve volgens de relatie van Athy (1930) met een oppervlakteporositeit $\emptyset(0) = 26\%$ (voor een wadi afzettingsmilieu). Curve B is de compactiecurve voor een oppervlakteporositeit van 40.0 % (voor een eolisch afzettingsmilieu). Voor de constante c werd de waarde 0.0002734 per meter gehanteerd (Sclater & Christie, 1980). De datapunten vertegenwoordigen de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit van de Boven-Rotliegend Groep als geheel (appendix C; Rijks Geologische Dienst, 1991a,b).



Boringen Kaartblad I

- 1 Bolsward
- 2 De Cocksdorp-1
- 3 Hollum Ameland-3
- 4 Harlingen-1
- 5 Meep-01
- 6 Oude Inschot-1
- 7 Riepel-1
- 8 Terschelling Zuid-1
- 9 Zuidwal-2
- 10 L12-1-A
- 11 M7-1

Boringen Kaartblad II

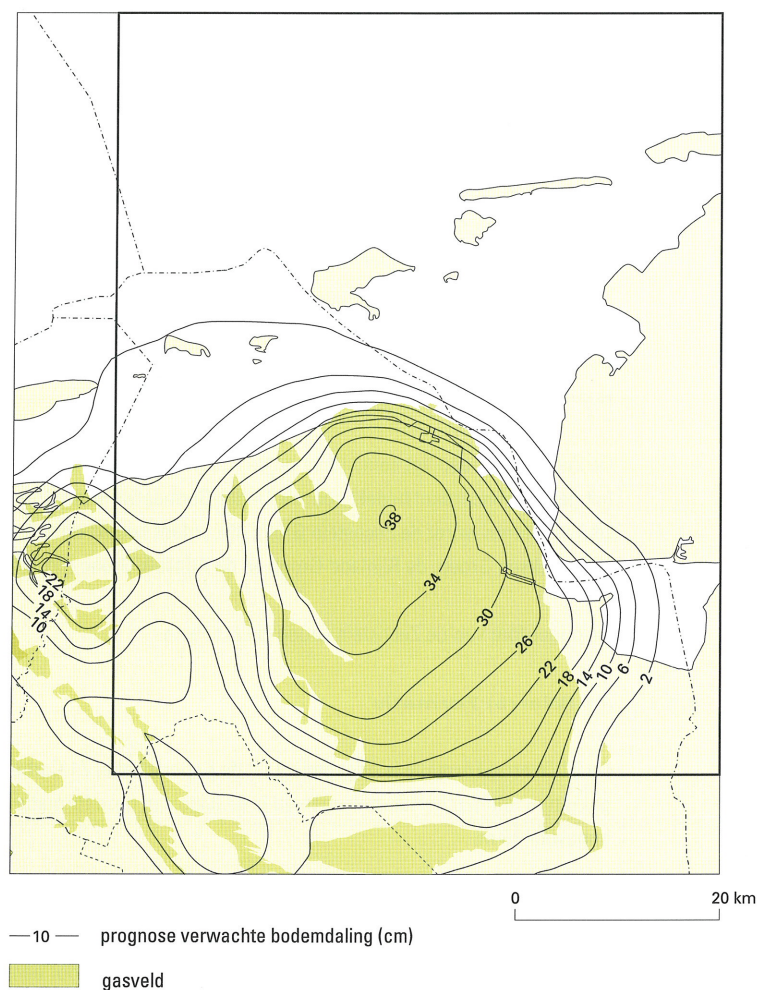
- ▲ 1 Allardsoog-1
- 2 Ameland Noord-3
- 3 Blija-Ferwerderadeel-102
- 4 Grootegast-102
- 5 Hantum-1
- 6 Leeuwarden-5
- 7 Marum-2
- 8 Noord-Bergum-1
- 9 Nes Noord-1
- 10 Opende Oost-1
- 11 Sint-Annaparochie-1

Boringen Kaartblad III

- + 1 Annerveen-Veendam-5
- 2 Bedum-1
- 3 Blijham-2
- 4 Boerakker-1
- 5 Goldhoorn-1
- 6 Heiligerlee-1
- 7 Harkstede-1
- 8 Leermens-7
- 9 Midlaren-1
- 10 Oldorp-1
- 11 Overschild-1
- 12 Roden-102
- 13 Tjuchem-2
- 14 Uithuizen-1
- 15 Usquert-1
- 16 Vries-4
- 17 Warffum-1
- 18 Winsum-1
- 19 't Zandt-1
- 20 Zevenhuizen-1

Als gevolg van gasproductie uit het Groningen veld, sinds 1963, was in 1990 de bodem boven het centrum van het veld 18 cm gedaald (Doornhof, 1992). Bodemdaling treedt op als gevolg van compactie van het Boven-Rotliegend reservoir na gasonttrekking. Volgens de prognose van de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM, 1995) zal in het jaar 2050 de maximale bodemdaling in het centrum van het veld 36 cm bedragen (fig. 3.9). Interferentie met de bodemdaling boven kleinere velden rond het Groningen veld kan dit beeld, zeker aan de randen, nog beïnvloeden. Met name boven de velden Munnekezijl en Grijpskerk is dit het geval. Voor indicaties betreffende de gasproductie in het gebied wordt verwezen naar appendix D.

Figuur 3.9 Verwachte bodemdaling in Groningen in het jaar 2050 als gevolg van aardgas winning (naar NAM, 1995).



4 Zechstein Groep

4.1 Stratigrafie

De Zechstein Groep is opgebouwd uit vijf formaties, die elk een evaporietcyclus vertegenwoordigen, en de Zechstein Boven-Kleistein Formatie (fig. 4.1). De cycli zijn gevormd door episodische instroming en daaropvolgende indamping van zeewater. Van oud naar jong zijn zij benoemd als de Z1 tot en met de Z5 Formatie. In verband met de sterke zoutvloed of halokinese in dit gebied zijn er nog twee namen gebruikt om specifieke Zechstein opeenvolgingen te beschrijven. Dit zijn het Zechstein Zout, een zoutpakket waarin steenzoutafzettingen van diverse cycli voorkomen en de Zechstein Caprock, het oplossingsresidu van Zechstein gesteenten. De opbouw van de Zechstein Groep wordt geïllustreerd met de boring Warffum-1, waar een bijna complete sectie aangeboord is (fig. 4.1).

De afzettingen van de groep komen in het gehele kaartbladgebied voor. Door zoutvloed zijn depletiegebieden ontstaan, waar de dikte sterk is gereduceerd, en accumulatiegebieden waar zoutruggen, zoutpijlers en zoutkussens zijn ontstaan met een veel grotere dikte dan de oorspronkelijke afzettingdikte (fig. 11.2). Door deze zoutvloed varieert de dikte van enkele tientallen meters tot meer dan 2500 m (Kaart 4). In de zoutpijler van Pieterburen is het zout omhoog gekomen tot circa 150 m onder het maaiveld.

De dieptekaart van de basis van de Zechstein Groep vertoont een zelfde trend als de dieptekaart van de basis van de Boven-Rotliegend Groep, met dezelfde structurele hogen en lagen en dezelfde NNW-ZZO en WZW-ONO georiënteerde breuken (respectievelijk Kaarten 1 & 2). Op het Groningen Hoog ligt de basis tussen 2650 en 2900 m diep, terwijl in de Lauwerszee Trog de basis zich tussen 3200 en 3500 m diepte bevindt. In het gebied van de Waddenzee bevindt de basis zich op een diepte van maximaal 3900 m. De dieptekaart van de top van de Zechstein Groep toont een heel ander beeld, wat het gevolg is van de halokinese (Kaarten 3 & 15). Naast het dieptepatroon is hierdoor ook het breukpatroon veranderd. De NNW-ZZO en WZW-ONO georiënteerde breuken, die de basis van de Zechstein Groep doorsnijden, zijn door het plastische gedrag van zout geaccommodeerd (Kaart 15). De deformatie van het bovenliggende pakket is zodoende ontkoppeld van het substraat. Wel bestaat er een verband tussen de ligging en de oriëntatie van de zoutstructuren en het breukpatroon eronder. Boven de grootste zoutpijlers en zoutruggen komen veelal inzakkingsstructuren voor (zie ook Hoofdstuk 11).

De Zechstein Groep ligt concordant op de Boven-Rotliegend Groep en wordt in het grootste deel van het gebied concordant bedekt door de Onder-Germaanse Trias Groep (Kaart 5). Boven enkele grote zoutstructuren wordt de Zechstein Groep discordant bedekt door de Boven-Germaanse Trias Groep, de Nedersaksen Groep, de Rijnland Groep en de Krijtkalk Groep (fig. 4.2).

De ouderdom van de Zechstein Groep is Laat-Perm.

4.1.1 Z1 (Werra) Formatie

De Z1 (Werra) Formatie is opgebouwd uit de Koperschalie, Z1 Carbonaat en Z1 Anhydriet Laagpakketten. Binnen het kaartbladgebied is de dikte van deze formatie vrij constant en bedraagt ongeveer 35 m.

De *Koperschalie* is een ongeveer 1 m dikke, zwarte schalie die rijk is aan organisch materiaal. Deze eenheid ligt aan de basis van de Zechstein Groep en wordt aangetroffen in vrijwel het gehele Zuidelijk Perm Bekken. De Koperschalie wordt gekenmerkt door een karakteristieke piek op de gamma-ray log, die wordt veroorzaakt door een hoog gehalte aan radioactieve mineralen (fig. 4.1).

De Z1 *Anhydriet* bestaat uit anhydriet met enige dolomiet-inschakelingen. De dikte bedraagt meestal 20 tot 25 m.

WARFFUM-1 (NAM)

Diepte in m.	RB Groep	Form.	Laag-pakket	Gamma-Ray		Litho	Sonic		
				0	150		140	40	
2300	Zechstein	ZEUC	5H						
		Z5	5R						
		Z4 (Aller)	4H						
			4A						
			4R						
			3H						
2400		Zechstein	Z3 (Leine)						
2500	Zechstein	Z2 (Stassfurt)	3A						
			3G						
			3C						
			2T						
			2H						
			2A						
			2C						
			1A						
			1C						
			1K						
2600	Zechstein	Z1							
2700	Zechstein	Z1							
2800	Zechstein	Z1							
2900	Zechstein	Z1							

kleisteen

anhydriet

dolomiet

zout

kalksteen

KMg zout

Legend:

RB Onder-Germaanse Trias Groep

RO Boven-Rotliegend Groep

ZEUC Zechstein Boven-Kleisteel

Z5 Z5 (Ohre)

Z1 Z1 (Werra)

5H Z5 Zout

5R Z5 Klei

4H Z4 Zout

4A Z4 Pegmatiet Anhydriet

4R Rode Zoutklei

3H Z3 Zout

3A Z3 Hoofd-Anhydriet

3C Z3 Carbonaat

3G Grijze Zoutklei

2T Z2 Dakanhydriet

2H Z2 Zout

2A Z2 Basale Anhydriet

2C Z2 Carbonaat

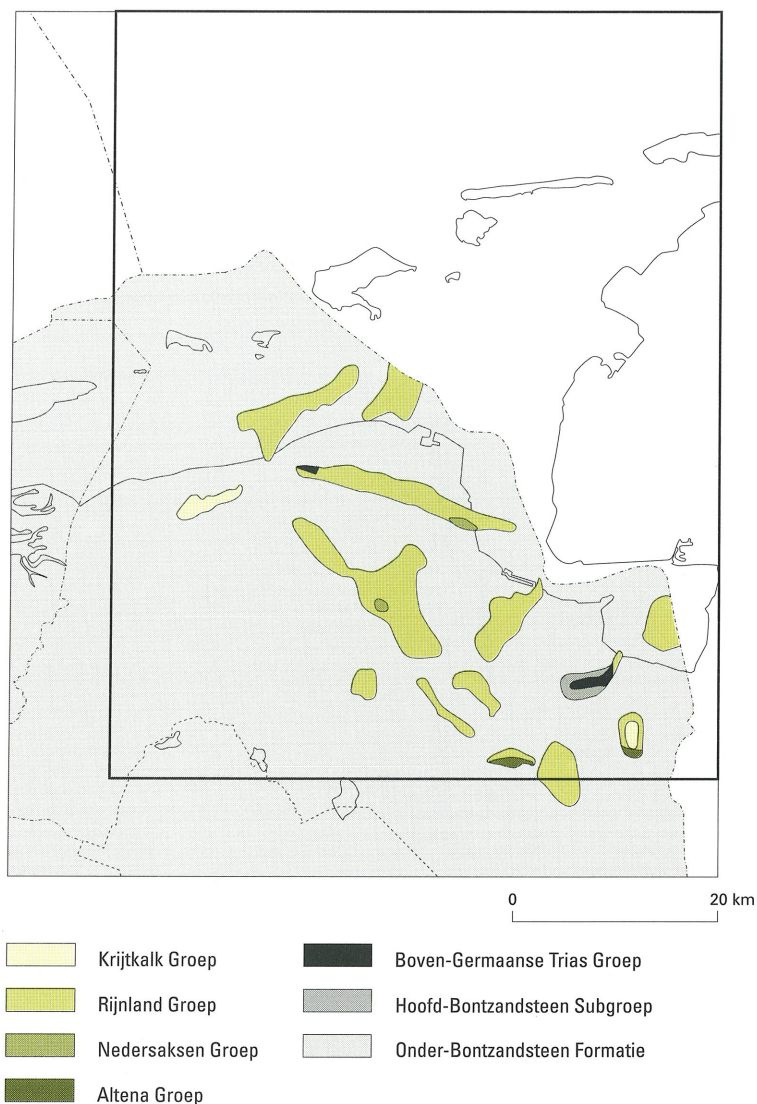
1A Z1 Onder-Anhydriet

4.1.2 Z2 (Stassfurt) Formatie

De Z2 Formatie is opgebouwd uit de Z2 Carbonaat, Z2 Basale Anhydriet, Z2 Zout en Z2 Dakanhydriet Laagpakketten. De Z2 Formatie omvat een vrijwel complete indampingscyclus.

De huidige diktevariatie in de Z2 Formatie is het gevolg van halokinese, maar de oorspronkelijke afzettingsdikte is in het kaartbladgebied waarschijnlijk vrij constant geweest. Dit valt te concluderen uit de uniforme dikte van het rigide Z2 Carbonaat laagpakket, dat alleen een gering verschil in afzettingsdikte vertoont tussen het Groningen Hoog en de Lauwerszee Trog en uit het feit dat overal boven het Z2 Zout de Z2 Dakanhydriet en de Grijs Zoutklei (Z3) voorkomen. Dit laatste geeft aan dat er gedurende de afzetting van het Z2 Zout geen of nauwelijks reliëf in het bekken is ontstaan. De maximale huidige dikte van de Z2 Formatie wordt bereikt in de structuur Pieterburen met 2700 m halokinetisch verstoord Zechstein sediment. In depletie-gebieden, waar het Z2 Zout volledig is weggevoerd, rest slechts circa 15 m Z2 Carbonaat en Anhydriet.

Figuur 4.2 Kaartbeeld van de lithologische eenheden die de Zechstein Groep bedekken. Met uitzondering van de gebieden waar zich zoutaccumulaties bevinden wordt de Zechstein Groep concordant bedekt door de Onder-Germaanse Trias Groep. Boven zoutaccumulaties kan de Zechstein Groep discordant worden bedekt door jongere groepen.



De *Z2 Carbonaat* bestaat uit een donkere, fijngelamineerde afwisseling van kalksteen, dolomiet en anhydriet, met een naar de top toenemend kleigehalte. De gemiddelde dikte van de *Z2 Carbonaat* is ongeveer 10 m.

De *Z2 Basale Anhydriet* is opgebouwd uit een wit tot beige gekleurde anhydriet. De dikte is 2 tot 5 m.

Het *Z2 Zout* is wit tot doorschijnend, meest grof- en soms fijnkristallijn. Binnen het *Z2 Zout* kunnen vaak drie zoutpakketten worden onderscheiden. De pakketten worden van elkaar gescheiden door polyhaliet-houdende ($\text{Ca}_2\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) anhydrietlaagjes. Op de gamma-ray en sonic logs zijn deze laagjes te onderscheiden van het zuivere steenzout door een hogere gammastraling en een lagere snelheid. Deze driedeling is goed te correleren in Noord-Nederland en op het aangrenzende Continentaal plat (Geluk, 1995). In het kaartbladgebied ontbreken plaatselijk de polyhalietlaagjes als gevolg van halokinese. In figuur 4.1. is alleen het bovenste zoutpakket te onderscheiden van het middelste zoutpakket. De zoutpakketten bestaan uit zeer zuiver steenzout met alleen aan de top van het *Z2 Zout* een 5m dikke laag kalium-magnesiumzout. Deze laag vormt het equivalent van de 'Kaliflöz Stassfurt', die op hetzelfde stratigrafische niveau in Duitsland voorkomt (Kulick & Paul, 1987).

De grote diktevariatie in het *Z2 Zout* is het gevolg van scheefstelling en zoutvloeï. De grootste dikte binnen het kaartblad wordt bereikt in de zoutstructuur Winschoten (2200 m). Het zuivere steenzout (97-99% zuiver NaCl) wordt door middel van oplossingsmijnbouw gewonnen op de productielocaties Zuidwending en Winschoten, gelegen in de concessie 'Adolph van Nassau'.

De *Z2 (Stassfurt) Formatie* eindigt met de *Z2 Dakanhydriet*. Dit is een zuivere anhydriet, met een dikte van maximaal enkele meters.

4.1.3 **Z3 (Leine) Formatie**

De *Z3 (Leine) Formatie* wordt onderverdeeld in de Grijze Zoutklei, *Z3 Carbonaat*, *Z3 Hoofdanhydriet* en *Z3 Zout Laagpakketten*.

De *Z3 (Leine) Formatie* wordt bijna in het gehele gebied concordant bedekt door de *Z4 (Aller) Formatie*, maar door halokinese of erosie komt ook een discordant contact met de Onder-Germaanse Trias Groep of de Rijnland Groep voor.

De *Grijze Zoutklei* is een 2 tot 3 m dikke, grijze kleisteen. Deze eenheid heeft een hogere uitslag op de gamma-ray log ten opzichte van de eronder gelegen *Z2 Anhydriet* en de erboven liggende *Z3 Carbonaat* (fig. 4.1).

De *Z3 Carbonaat* (of Plattendolomiet) is opgebouwd uit een fijnkristallijne, beige tot lichtbruine dolomiet. De carbonaat is over het hele gebied goed te herkennen. De dikte varieert van 15 m tot 30 m.

De *Z3 Hoofdanhydriet* bestaat uit witte anhydriet, met in het onderste deel carbonaat-inschakelingen en kleisteenlaagjes. De dikte van deze eenheid varieert van 15 tot 80 m binnen het kaartbladgebied. Dit kan naast een primair sedimentair dikteverschil veroorzaakt zijn door scheefstelling ten gevolge van zoutvloeï waardoor de aangeboorde dikte groter lijkt dan de werkelijke dikte.

Het *Z3 Zout* is onder te verdelen in 2 eenheden bestaande uit een dik pakket massief steenzout aan de basis, overgaande in een pakket bestaande uit magnesium- en kaliumzout, en enkele kleisteenbankjes. In figuur 4.1 is de basale zuivere steenzout eenheid ca. 110 m dik. Het tweede pakket bestaat uit K-Mg

zout, een opeenvolging redelijk zuiver steenzout met daarop wederom K-Mg zouten met ingeschakelde kleisteenlagen. Door het hele gebied is deze onderverdeling goed te correleren. Het steenzout is doorschijnend wit of rose tot geel en varieert van 98% zuiver NaCl tot steenzout met anhydrietlaagjes en kalium-magnesiumzout-inschakelingen. De kalium-magnesium zouten bestaan voornamelijk uit carnalliet ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) aangevuld met haliet (NaCl) en het kieseriet ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). In het onderste pakket komt ook het zeldzame magnesiumzout bischoffiet ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) voor. Aan de basis van een magnesiumzout interval komen sylviet (KCl) en langbeiniet ($\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$) voor. In de Veendam structuur, gelegen net ten zuiden van het kaartbladgebied, is door differentiële zoutvloeit het kalium-magnesiumhoudende zoutpakket verdikt en op een ontginbare diepte (1500-2000 m) gekomen. Middels oplossingsmijnbouw wordt hier door NedMag Industries (voorheen Noordelijke Zoutwinning BV) het waardevolle magnesiumhoudende zout gewonnen voor de productie van magnesiumoxide (Coelewij et al., 1978).

4.1.4 Z4 (Aller) Formatie

De Z4 (Aller) Formatie is oorspronkelijk over het hele gebied afgezet. Door de aan zoutbewegingen gerelateerde erosie boven zout-structuren, komt de formatie daar niet meer voor. De formatie bestaat uit de *Rode Zoutklei*, met een dikte van maximaal 7 m, de 1 tot 4 m dikke *Z4 Pegmatiet-Anhydriet* en het plaatselijk 80 m dikke *Z4 Zout Laagpakket*. Ondanks de soms sterke deformatie van het onderliggende Zechstein pakket is deze opeenvolging redelijk goed te correleren.

Het Z4 Zout is op te splitsen in twee sequenties, die respectievelijk een toenemende en een afnemende saliniteit representeren. De eerste sequentie bestaat uit een 40 tot 50 m dik zoutpakket met daarin twee niveaus, met een verhoogd kalium-magnesium gehalte, van respectievelijk 10 en 15 m dik. Het tweede pakket bestaat uit een afwisseling van zout en kleisteen en vormt de top van de Z4 Formatie. Dit pakket heeft een dikte van 20-40 m. De aangeboorde dikte van het Z4 Zout varieert van enkele meters tot ca. 80 m. Het laagpakket is het dikst in het gebied buiten het Groningen Hoog en lokaal tussen (kleine) zoutaccumulaties op het Groningen Hoog.

De Z4 (Aller) Formatie wordt concordant bedekt door de Z5 (Ohre) Formatie of, mogelijk via een hiaat, door de Zechstein Boven-Kleisteen Formatie. Ten gevolge van diapirisme kan de formatie boven zoutstructuren bedekt worden door jongere afzettingen.

4.1.5 Z5 (Ohre) Formatie

Deze formatie vertegenwoordigt de jongste evaporiet cyclus in Nederland. De formatie komt voor op de westelijke helft van het Groningen Hoog met een uitloper in de richting van Rottumerplaat.

De Z5 (Ohre) Formatie bestaat uit een basale kleisteen van ongeveer 5 m dik met daarboven een steenzoutafzetting van maximaal 15 m (fig. 4.1). De steenzoutafzetting wordt dikker naar het zuiden en oosten.

4.1.6 Zechstein Boven-Kleisteen Formatie

De Zechstein Boven-Kleisteen Formatie is een anhydritisch kleisteen-pakket tussen de bovenste, herkenbare evaporiet cyclus Z5 (Ohre) of Z4 (Aller) Formatie en de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep. Aan de basis vertoont de formatie meestal een hiaat. De kleistenen van de Zechstein Boven-Kleisteen kenmerken zich door lage akoestische snelheden. De basis bestaat uit een dun kleilaagje (1 m) met hierboven een anhydritisch laagje (± 2 m), dat op de logs herkenbaar is aan de

zeer lage gamma-ray waarde. Deze onderste 3 m zouden de bekkenrandafzettingen kunnen representeren van een hogere Zechstein cyclus. De top van het pakket wordt gevormd door een 10 tot 15 m dikke anhydritische kleisteen. Deze afzetting wordt, net als de halietafzetting van de Z5 (Ohre) Formatie, naar het oosten en het zuiden iets dikker.

4.1.7 Zechstein Zout

Zechstein Zout is de naam voor de halokinetisch verstoorde opeenvolging boven de Z2 Basale Anhydriet, waarbinnen de depositionele cycli Z2 tot en met Z4 niet meer kunnen worden onderscheiden.

4.1.8 Zechstein Caprock

De Zechstein Caprock is een eenheid die bestaat uit anhydritische gips of gips-houdende anhydriet en komt boven zoutstructuren voor die zich dicht onder het maaiveld bevinden of hebben bevonden. Door subsidie, het ondergronds oplossen van zoutpakketten door grondwaterstromen, is er een oplossingsresidu ontstaan dat bestaat uit de minder oplosbare zouten en sulfaten. De dikte van dit pakket is variabel en hangt onder meer af van de diepteligging en de geohydrologische omstandigheden. In de Winschoten zoutpijler is de caprock 33 m dik en in de ondieper gelegen Pieterburen zoutpijler 100 m dik.

4.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Evenals tijdens de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep maakte het gebied binnen het kaartblad tijdens de afzetting van de Zechstein Groep deel uit van het Zuidelijk Perm Bekken (fig. 3.4). Aan het begin van het Laat-Perm vond een snelle transgressie plaats in de tijdens het Vroeg-Perm ontstane depressie (Glennie & Buller, 1983). Onder invloed van het heersende aride klimaat, door de vorm van het bekken, en de periodieke instroom van vers zeewater en de successievelijke indamping hiervan konden zich dikke evaporietcycli ontwikkelen.

In de Zechstein Groep representeren de 5 evaporietcycli een opeenvolging van transgressies en regressies. Tijdens een transgressieve periode werden, onder de lagere saliene condities, kleien en carbonaten afgezet. Tijdens een regressieve periode verhoogde, onder invloed van het aride klimaat, de saliniteit en werden er evaporieten afgezet. De zeespiegelfluctuaties hingen vermoedelijk samen met de afwisseling van Laat-Permische glacialen en interglacialen (Ziegler, 1988).

De eerste sedimentaire cyclus van de Zechstein Groep begon met een transgressie waarbij, in een stagnerend bekken, de Koperschalie in een reducerend milieu werd afgezet (Taylor, 1986). De carbonaten werden in een open marien milieu onder normaal-saliene omstandigheden gevormd. Tengevolge van het terugtrekken van de zee en toenemende isolatie van het bekken nam de saliniteit snel toe, mede dankzij de hoge verdampingsgraad onder de heersende aride condities. Uit de zo ontstane pekel sloegen allereerst sulfaten neer. Dit gebeurde in eerste instantie in de vorm van gips, dat na dehydratie omzet naar anhydriet. Als gevolg van de lagere waterspiegel zijn deze sulfaten in een beperkter gebied afgezet dan de carbonaten. De in de anhydriet ingeschakelde carbonaten wijzen op fluctuaties in de hoeveelheid instromend zeewater. Tijdens afzetting van de Z1 (Werra) Formatie vond slechts gedeeltelijke indamping van het zeewater plaats. Hierdoor bleef de saliniteit beperkt en werd er, behalve op enkele locaties langs de rand van het Zuidelijk Perm Bekken, geen steenzout afgezet.

De Z2 (Stassfurt) Formatie weerspiegelt een complete indampingscyclus. Na de afzetting van carbonaat en anhydriet werd hier steenzout afgezet. Dit steenzout (haliet), precipiteert als het zeewater tot één-tiende van het oorspronkelijk volume is ingedampt. Wanneer de instroom van vers zeewater gelijke tred houdt met de verdamping daarvan, blijft de concentratie van de zouten constant, en zal de neerslag van haliet voortduren. De verschillende steenzoutpakketten binnen het Z2 Zout worden door polyhalietbanken gescheiden. Dit polyhaliet ($\text{Ca}_2\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is een zout dat neerslaat wanneer in een bekken de aan polyhaliet of MgSO_4 en KSO_4 verzadigde pekkel zich mengt met CaSO_4 -rijk zeewater (Braitsch, 1971). De ritmische afwisseling van polyhaliet met steenzout is een aanwijzing voor een cyclische fluctuatie van instromend vers zeewater (Geluk, 1995). Het zeer zuivere steenzout in het bovenste zoutpakket van het Z2 Zout wijst mogelijk op geresedimenteerd zout. De kalium-magnesium zouten zijn gevormd tijdens de hoogste zoutconcentratie van de aanwezige pekkel in het bekken.

De derde, grote transgressie deed de saliniteit van de in het bekken aanwezige pekkel weer tot die van normaal zeewater afnemen, waarna opnieuw een evaporiet-cyclus, Z3 (Leine) werd afgezet.

Het hypersaliene karakter (er zijn géén carbonaten afgezet), de steeds dominantere positie van de kleisteen en de geringere verspreiding van de Z4 (Aller) en Z5 (Ohre) Formaties, duiden op het steeds verder droogvallen van het Zuidelijk Perm Bekken. De afzettingen van deze laatste 2 Formaties vulden veel van het resterende reliëf op, hetgeen de uniforme dikte verklaart van de Zechstein Boven-Kleisteen. Deze werd aan de rand van het bekken, onder playa-achtige omstandigheden, afgezet. Zij vormt duidelijk een overgangsgesteente tussen de mariene zoutpakketten en de continentale zand-klei pakketten van de Onder-Germaanse Trias Groep.

De dikteverschillen in met name de Z4 (Aller) en Z5 (Ohre) Formaties en het pre-saliene substratum, dat gevormd wordt door de Z1 (Werra) Formatie, de Z2 Carbonaat en de Z2 Basale Anhydriet, zijn indicatief voor het aanwezige reliëf en differentiële daling. Deze dikteverschillen zijn slechts minimaal maar wijzen op het bestaan van kleine bekkens en ondieptes in dit gebied tijdens het Laat-Perm. De dunste afzettingen bevinden zich in een gebied dat ruwweg samenvalt met het noordoostelijk deel van het Groningen Hoog. Tevens ontbreekt hier, mogelijk als gevolg van non-depositie of erosie, de Z5 (Ohre) Formatie.

5 Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep

5.1 Stratigrafie

De Trias afzettingen bestaan uit rood- en groengekleurde klastische sedimenten, grijsgekleurde kalken en mergels en evaporieten. Binnen de Trias afzettingen worden een Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep onderscheiden. De ouderdom van de afzettingen is Laat-Perm tot en met Laat-Trias.

De Onder-Germaanse Trias Groep komt in het hele kaartbladgebied voor, terwijl de Boven-Germaanse Trias Groep alleen in de Lauwerszee Trog en het Eems Diep voorkomt. Beide groepen zijn in sterke mate door erosie aangetast (fig. 5.1). De eerste erosiefase trad op aan het einde van de Vroeg-Trias. Deze fase is gerelateerd aan het ontstaan van de Netherlands Swell (fig. 5.2) en heeft geresulteerd in een discordant contact tussen de twee groepen. De mate van insnijding laat zien dat de Netherlands Swell een gering reliëf had. Post-Trias erosie, gerelateerd aan de Kimmerische deformatiefasen heeft diep ingesneden in de Boven-Germaanse Trias Groep, op het Groningen Hoog zelfs tot diep in de Onder-Germaanse Trias Groep. In de dalingsgebieden is een groot deel van de Boven-Germaanse Trias Groep bewaard gebleven; in het Eems Diep is zij zelfs vrijwel compleet.

De dikte van de totale Trias opeenvolging varieert van ongeveer 200 m op het Groningen Hoog tot ruim 1800 m in het Eems Diep (Kaart 6). De basis van de Trias afzettingen ligt rond de 2000 meter op het Groningen Hoog. Deze diepte neemt zowel in de Lauwerszee Trog als in het Eems Diep toe tot ruim 3500 m (Kaart 5). Sterke locale dikte- en diepteveranderingen zijn het gevolg van zoutbewegingen.

De stratigrafische opbouw van de Trias afzettingen wordt geïllustreerd aan de hand van de boring Goldhoorn-1 (fig. 5.3).

5.2 Onder-Germaanse Trias Groep

5.2.1 Stratigrafie

De Onder-Germaanse Trias Groep is opgebouwd uit de Onder-Bontzandsteen Formatie, die overwegend uit kleisteen bestaat en de Hoofd-Bontzandsteen Subgroep, die een afwisseling van zandsteen en kleisteen vertoont (fig. 5.3). De klastische sedimenten zijn onder continentale omstandigheden afgezet, en worden gekenmerkt door een karakteristieke rode kleur.

De Onder-Germaanse Trias Groep is in het grootste deel van het kaartblad aanwezig. Alleen op het Groningen Hoog, boven enkele zoutaccumulaties ontbreekt de groep (Kaart 6). De dikte van de complete groep neemt in oostelijke richting toe van circa 350 tot 450 m.

De Onder-Germaanse Trias Groep ligt, weliswaar met een vrij abrupte faciesverandering, concordant op de Zechstein Groep. Aan de bovenzijde wordt zij discordant bedekt door verschillende lithologische eenheden. In het westen, zuiden en oosten is dat de Boven-Germaanse Trias Groep. Het deel van het kaartbladgebied dat ruwweg samenvalt met het Groningen Hoog, wordt discordant bedekt door de Vroeg-Krijt sedimenten van de Rijnland Groep (fig. 1.8).

De ouderdom van de Onder-Germaanse Trias Groep is Laat-Perm tot Scythien.

5.2.2 Onder-Bontzandsteen Formatie

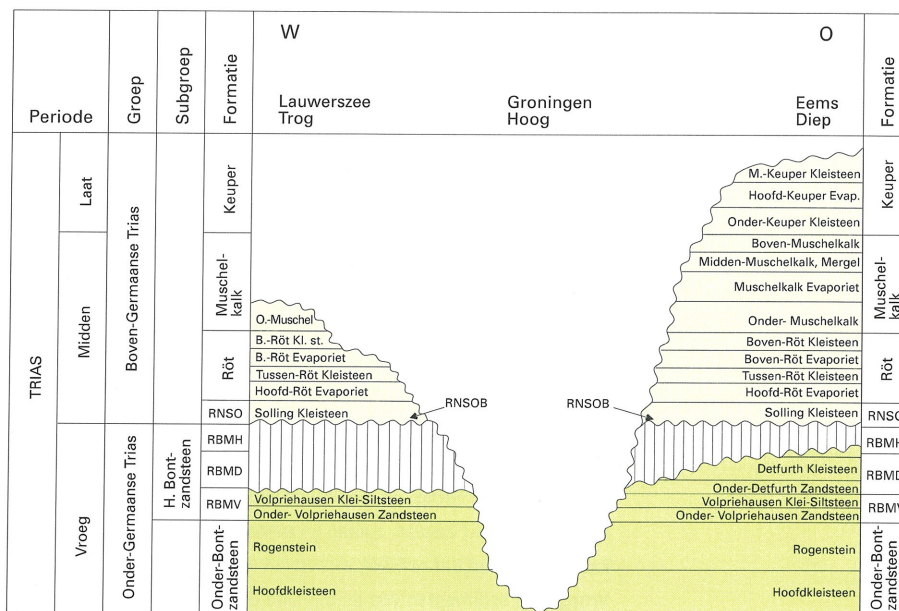
De Onder-Bontzandsteen Formatie is opgebouwd uit de Hoofdkleisteel en Rogenstein Laagpakketten (fig. 5.1). De huidige verbreiding van de formatie is gelijk aan de verbreiding van de Onder-Germaanse Trias Groep (fig. 5.2). Waar de formatie compleet aanwezig is, is de maximale dikte ca. 365 m.

De formatie wordt concordant bedekt door de Hoofd-Bontzandsteen Formatie, of discordant door de Solling Formatie of de Rijnland Groep.

De *Hoofdkleisteel* is opgebouwd uit een cyclische opeenvolging van naar boven toe verfijnende klei-siltsteel sequenties, met aan de basis dunne fijnkorrelige zandsteelbankjes. Het gesteente is plaatselijk anhydritisch en heeft voornamelijk een roodbruine kleur, soms afwisselend groen en donkergrijs. De cyclische opbouw is goed te vervolgen op de akoestische snelheidslog (fig. 5.3), en op regionale schaal zeer goed correleerbaar. De ontwikkeling binnen het kaartbladgebied laat zich goed vergelijken met die in Noord-Holland en Noordwest-Duitsland (Brüning, 1986; Geluk & Röhling, in prep.). Indien de Hoofdkleisteel compleet aanwezig is, bedraagt de dikte van de eenheid circa 190 m.

De *Rogenstein* bestaat uit rood- en groengekleurde fijngelamineerde klei- en siltsteel met veel zwarte en witte glimmers en oölietbanken. In de kleisteel kunnen plaatselijk anhydriet knollen voorkomen. De oölietbanken geven de Rogenstein een karakteristiek logbeeld (fig. 5.3). De kalkige oölietbanken hebben een lage gamma-ray straling, hoge dichtheid en hoge akoestische snelheid. De oölietsteel zijn gecementeerde grainstones, met oöiden tot enkele millimeters groot. De basis van de Rogenstein

Figuur 5.1 Schematische stratigrafische indeling van de Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep. Het hiaat, aangegeven door middel van verticale arcering, aan het einde van de Vroeg-Trias is het gevolg van de Hardegsen deformatiefase. Kimmerische bewegingen aan het einde van de Jura worden gereflecteerd in de verschillende mate van erosie in de Lauwerszee Hoog, op het Groningen Hoog en in het Eems Diep.



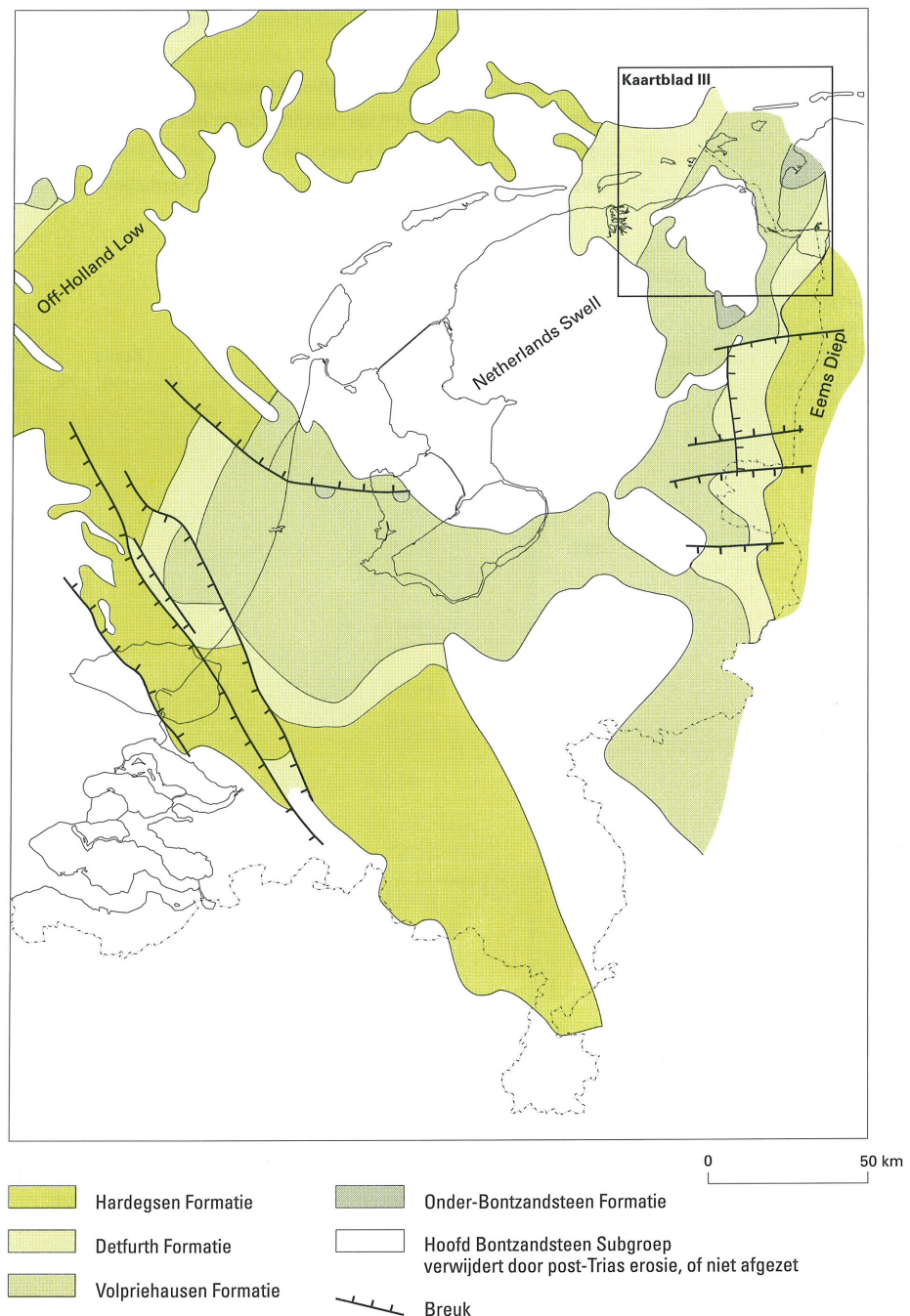
RBMSO Solling Formatie
 RBMH Hardegsen Formatie
 RBMD Detfurth Formatie
 RBMD Volpriehausen Formatie
 RNSOB Basale Solling Zandsteel Laagpakket

Hiaat gerelateerd aan
 Basis Solling discordantie

wordt gelegd bij de eerste oölietbank. Deze is in het gehele kaartbladgebied goed te herkennen. Na 75 m, waarin enkele dunne oölietische banken voorkomen, volgen drie karakteristieke oölietbanken die eveneens in het gehele kaartbladgebied goed te vervolgen zijn.

In het centrum van de Lauwerszee Trog is het Rogenstein Laagpakket waarschijnlijk het dikst. De Rogenstein heeft in het zuidwesten van het kaartbladgebied een dikte van 170 m. In het noorden en

Figuur 5.2 Afgedekte geologische kaart van de afzettingen onder de Basis-Solling discordantie. De omvang van de Netherlands Swell blijkt uit het erosieprofiel. Het kaartbladgebied ligt in het noorden van de Netherlands Swell (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995).



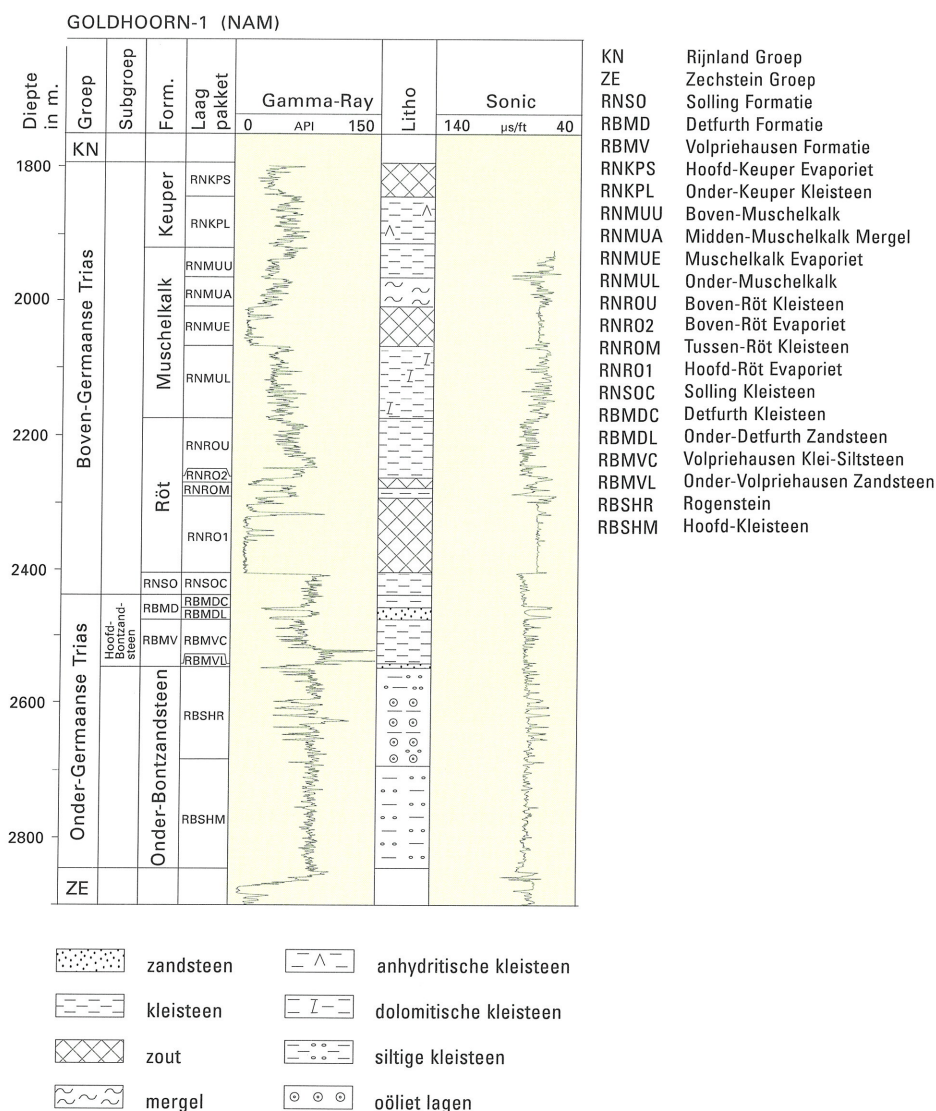
noordoosten is de dikte ongeveer 140 m. Deze variatie zou kunnen wijzen op een erosief contact met de bovenliggende Volpriehausen Zandsteen. Plaatselijk is het mogelijk dat de Rogenstein discordant bedekt wordt door de Basis-Solling Zandsteen van de Boven-Germaanse Trias Groep. Op het Groningen Hoog is door latere erosie de Rogenstein vaak incompleet of niet aanwezig.

5.2.3 Hoofd-Bontzandsteen Subgroep

De Hoofd-Bontzandsteen Subgroep bestaat uit drie zandsteen-kleisteel cycli, van onder naar boven zijn dit de Volpriehausen, de Detfurth en de Hardeggen Formaties.

De subgroep is in het hele kaartbladgebied afgezet maar op het Groningen Hoog door latere erosie geheel verdwenen. Alleen aan de randen van het Groningen Hoog in enkele door zoutdepletie ontstane synclines, in de Lauwerszee Trog en in het Eems Diep bevindt zich nog een deel van de Hoofd-Bontzandsteen Subgroep. De Hardeggen Formatie is niet aangeboord in het kaartbladgebied

Figuur 5.3 Stratigrafische indeling van de Onder- en Boven-Germaanse Trias Groep in de boring Goldhoorn-1 aan de hand van het logbeeld.



maar regionale correlaties duiden erop dat zij in het uiterste zuid-oosten wel voorkomt (fig. 5.2). De grootste in boringen waargenomen dikte van de subgroep is 107 m (Goldhoorn-1, fig. 5.3). Het valt te verwachten dat de dikte in oostelijke richting nog iets toeneemt.

De Hoofd-Bontzandsteen Subgroep ligt concordant op de Onder-Bontzandsteen Formatie, en wordt discordant bedekt door de Boven-Germaanse Trias Groep of de Rijnland Groep.

5.2.3a Volpriehausen Formatie

De Volpriehausen Formatie omvat het Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket en het Volpriehausen Klei-Siltsteen Laagpakket.

De *Onder-Volpriehausen Zandsteen* vormt de basis van de formatie (fig. 5.1). Het laagpakket bestaat uit roodbruine en grijsgroene, soms kleiige, zandsteenbanken (plaatselijk anhydrythoudend) met inschakelingen van roodbruine kleisteen. De zandstenen zijn slecht geconsolideerd en matig gesorteerd. De dikte van het laagpakket bedraagt ongeveer 8 m. De onder- en bovengrens van de eenheid worden gekenmerkt door abrupte overgangen (fig. 5.3).

De *Volpriehausen Klei-Siltsteen* bestaat uit afwisselend zachte roodbruine en groene tot grijze, mergelige klei en uit klei- en anhydritische siltsteen met dunne zandige niveaus, oölietlaagjes en anhydrietknollen. Naar boven neemt het zandgehalte toe wat een bepaling van de bovengrens bemoeilijkt. Ten oosten van het Groningen Hoog bereikt het laagpakket zijn maximale dikte van ongeveer 70 m. Ten gevolge van erosie is in het overige kaartbladgebied de dikte sterk gereduceerd of is het laagpakket niet aanwezig. Het laagpakket wordt discordant bedekt door de Detfurth Formatie, de Solling Formatie of de Rijnland Groep.

5.2.3b Detfurth Formatie

De Detfurth Formatie is binnen het kaartbladgebied opgebouwd uit de Onder-Detfurth Zandsteen en de Detfurth Kleisteen Laagpakketten.

De *Detfurth Zandsteen* bestaat uit twee goed te onderscheiden zandsteen niveaus die van elkaar gescheiden worden door een roodbruine, anhydritische siltsteen of siltige kleisteen. De *Detfurth Kleisteen* is een pakket van homogene, soms enigszins siltige, anhydriet-rijke kleistenen. De Detfurth Kleisteen wordt concordant bedekt door de Hardeggen Formatie of discordant door de Solling Formatie of de Rijnland Groep. De dikte van de formatie bedraagt 30-35 m.

5.2.3c Hardeggen Formatie

De Hardeggen Formatie bestaat uit een regelmatige afwisseling van beige tot roze zandsteen en rode kleisteen. Het Laagpakket ligt concordant op de Detfurth Formatie en wordt discordant bedekt door de Solling Formatie. De formatie is niet aangeboord en komt slechts in het uiterste zuidoosten van het blad voor (fig. 5.3).

5.3 Boven-Germaanse Trias Groep

5.3.1 Stratigrafie

De Boven-Germaanse Trias Groep is met uitzondering van het Basale Solling Zandsteen Laagpakket opgebouwd uit klei- en siltsteen, evaporieten, mergels en kalksteen. Binnen de groep worden de Solling, Röt, Muschelkalk en Keuper Formatie onderscheiden (fig. 5.1).

De afzettingen van de Boven-Germaanse Trias Groep komen rondom het Groningen Hoog voor. Op het Groningen Hoog is de Boven-Germaanse Trias Groep door latere erosie verdwenen (fig. 1.8 & 5.1). De dikste afzettingen van de Boven-Germaanse Trias Groep komen voor in het gebied ten oosten van het Groningen Hoog in het Eems Diep. Hier bevinden zich twee rand-synclines als gevolg van de zoutvloed naar de zoutstructuren van Winschoten en Klein-Ulsda. In dit gebied ligt de in figuur 5.3 getoonde boring Goldhoorn-1 waar de Boven-Germaanse Trias Groep een maximale dikte heeft van ruim 650 m. In het uiterste zuidoosten van het kaartbladgebied bereikt de groep de grootste dikte van ruim 1400 m.

De groep ligt discordant op de Onder-Germaanse Trias Groep gescheiden door de Basis Solling discordantie. Figuur 5.3 geeft aan welke formaties door de Boven-Germaanse Trias Groep worden afgedekt. In de richting van de Netherlands Swell ligt deze discordant op steeds diepere eenheden van de Trias opeenvolging. In het grootste deel van het kaartbladgebied wordt de groep discordant bedekt door de Rijnland Groep. In het uiterste zuidoosten en wordt de groep discordant bedekt door de Altena Groep.

De ouderdom van de Boven-Germaanse Trias Groep is Laat-Scythien tot Carnien.

5.3.2 Solling Formatie

De Solling Formatie bestaat uit een kleisteen met anhydriet inschakelingen en een dunne basale zandsteen (fig. 5.3). Zij wordt onderverdeeld in het Basale Solling Zandsteen, en Solling Kleisteen Laagpakket.

De *Basale Solling Zandsteen* is een fijnkorrelige, soms anhydritische zandsteen met kalksteen, dolomiet en roodbruine tot grijsgroene siltsteen-inschakelingen. De zandsteen is iets meer gecementeerde dan de onderliggende zandpakketten, waardoor het in de meeste gevallen een hoge weerstandswaarde en een hogere akoestische snelheid heeft op de boorgatmetingen. Overigens blijft het moeilijk om ten westen van het Groningen Hoog de Basale Solling Zandsteen te onderscheiden van de zandige top van de Volprieausen Klei- en Siltsteen of de top van het Rogenstein Laagpakket. Het is onduidelijk of het laagpakket overal is afgezet. De zandsteen is aangeboord ten oosten van het Groningen Hoog en in de buiten het kaartbladgebied gelegen boringen in het zuidelijk deel van de Lauwerszee Trog. De dikte van de zandsteen varieert tussen 3 en 10 m.

De *Solling Kleisteen* is opgebouwd uit grijsgroene en rode kleisteen. Deze kleisteen is soms mergelig en anhydritisch en heeft dunne siltsteen-, kalksteen- en dolomietinschakelingen. Evenals de Basale Solling Zandsteen komt de Solling Kleisteen voor in de Lauwerszee Trog en het Eems Diep. In het Eems Diep bedraagt de dikte circa 40 m.

5.3.3 Röt Formatie

De Röt Formatie bestaat uit een viertal Laagpakketten; de Hoofd-Röt Evaporiet, de Tussen-Röt Kleisteen, de Boven-Röt Evaporiet en de Boven-Röt Kleisteen. De Röt Formatie komt rondom het Groningen Hoog voor, in het gehele verbreidingsgebied van de Boven-Germaanse Trias Groep. De maximale dikte van de formatie wordt bereikt ten oosten van het Groningen Hoog en bedraagt ruim 200 m.

De Röt Formatie ligt concordant op de Solling Formatie. In de buurt van grote zoutaccumulaties is het mogelijk dat de Röt Formatie direkt op de Onder-Bontzandsteen Formatie of zelfs op de Zechstein Groep ligt. Dit lijkt een aanwijzing te zijn voor zeer vroege zoutbewegingen (zie ook hoofdstuk 11.3).

De Röt Formatie heeft een Laat-Scythien tot Vroeg-Anisien ouderdom.

De *Hoofd-Röt Evaporiet* bestaat uit een dunne basale anhydriet (± 2 m) en een pakket steenzout met aan de top een 10 tot 15 m dik anhydritisch kleisteenpakket met steenzoutinschakelingen. In het dikke steenzoutpakket (50 tot 100 m) komen enkele klei- en anhydrietinschakelingen voor. De overgang van de Solling Kleisteen naar de Hoofd-Röt Evaporiet is scherp en goed te herkennen op de logs. De dikte varieert van 65 tot 113 m. In de buurt van grote zoutaccumulaties kan de Hoofd-Röt Evaporiet plaatselijk in dikte variëren als gevolg van vroege Zechstein zoutbewegingen of als gevolg van Röt zoutbewegingen. Op meerdere plaatsen in het kaartbladgebied is de Hoofd-Röt Evaporiet plastisch vervormd. Dit heeft geleid tot duidelijke inzakkingsstructuren in het bovenliggende pakket.

De *Tussen-Röt Kleisteen* is een roodbruine, siltige, anhydritische kleisteen die soms kalkhoudend is. De kleisteen is een inschakeling in een evaporitisch pakket. Het laagpakket heeft een dikte van ca. 15 m.

De *Boven-Röt Evaporiet* bestaat in dit gebied uit een dunne, kleiige anhydrietbank met soms steenzout inschakelingen en is vergelijkbaar met de bovenste 15 m van de Hoofd-Röt Evaporiet. De dikte is gemiddeld 7 m.

De *Boven-Röt Kleisteen* bestaat uit een roodbruin- tot paarsgekleurde kleisteen. In het onderste gedeelte is de eenheid anhydritisch, terwijl het bovenste deel van de formatie een toenemend carbonaat-gehalte vertoont (fig. 5.3). De overgang naar de Muschelkalk Formatie is graduëel. Deze opeenvolging heeft een gemiddelde dikte van 60 m met een maximum van 88 m in de boring Goldhoorn-1 (fig. 5.3).

5.3.4 Muschelkalk Formatie

De Muschelkalk Formatie bestaat uit een kalksteen- en mergel-afwisseling met een evaporiet-inschakeling. Dit pakket wordt in het kaartbladgebied onderverdeeld in de Onder-Muschelkalk, Muschelkalk Evaporiet, Midden-Muschelkalk Mergel en Boven-Muschelkalk Laagpakketten (fig. 5.3). De Muschelkalk Formatie komt slechts voor in een klein gebied ten zuidoosten van het Groningen Hoog in het Eems Diep en in het noordelijke deel van de Lauwerszee Trog, gezien de grote dikte van de Trias afzettingen, 500 tot 800 m, aldaar (zie Kaart 6). Deze dikte maakt het aannemelijk dat hier één of meerdere laagpakketten van de Muschelkalk Formatie aanwezig zijn.

De formatie ligt concordant op de Röt Formatie en wordt concordant bedekt door de Keuper Formatie. Daar waar de Keuper Formatie is geërodeerd wordt de Muschelkalk Formatie discordant bedekt door de Rijnland Groep.

De Muschelkalk Formatie heeft een maximale dikte van ruim 300 m (in het uiterste zuidoosten) en een ouderdom van Midden-Anisien tot Vroeg-Ladinien.

De *Onder-Muschelkalk* bestaat voornamelijk uit grijze mergels en (kalkhoudende) kleisteen die plaatselijk roodbruin en anhydritisch kunnen zijn. Tevens komen in dit pakket kalksteen- en dolomietinschakelingen voor. De gemiddelde dikte is 105 m.

De *Muschelkalk Evaporiet* bestaat (in de boring Meeden-1) uit een afwisseling van anhydriet en kleisteen met aan de top een 15 m dik steenzoutpakket. Dit steenzoutpakket wordt dikker in de richting van het Eems Diep. In de boring Goldhoorn-1 bestaat de Muschelkalk Evaporiet voornamelijk uit steenzout met enkele dunne anhydriet- en kleisteeninschakelingen (fig. 5.3). De totale dikte van deze eenheid is in de boring Goldhoorn-1 57 m en in Meeden-1 42 m.

De *Midden-Muschelkalk Mergel* is een licht- tot donkergrijze mergel die plaatselijk roodbruin kan zijn. In de mergel komen siltsteen-, kleisteen- en dolomietinschakelingen voor. Aan de basis is de mergel anhydritisch en er zijn sporen van pyriet aanwezig. De dikte van de Midden-Muschelkalk Mergel bedraagt in de boring Goldhoorn-1 44 m (fig. 5.3).

De *Boven-Muschelkalk* bestaat uit roodbruine en lichtgrijze dolomiet, dolomitische schalie en mergel. De Boven-Muschelkalk wordt gescheiden van de Midden-Muschelkalk Mergel door een ± 5 m dikke basale dolomietbank. Deze is op de logs te herkennen aan een iets lagere waarde op de gamma-ray log en aan een zeer hoge akoestische snelheid. De eenheid is aangeboord in Meeden-1 en in Goldhoorn-1, alwaar de dikte van de eenheid 43 m bedraagt (fig. 5.3).

5.3.5 Keuper Formatie

De Keuper Formatie bestaat in het kaartbladgebied uit siltige kalkhoudende kleistenen, met ingeschaalde anhydriet-, dolomietbanken en steenzoutlagen. De formatie is hier onder te verdelen in de Onder-Keuper Kleisteen, Hoofd-Keuper Evaporiet, Rode Keuper Kleisteen, Dolomitische Keuper en Boven-Keuper Kleisteen Laagpakketten. Aan de basis van de Rode Keuper Kleisteen ligt de belangrijke Vroeg-Kimmerische discordantie. De Keuper Formatie ligt concordant op de Muschelkalk Formatie en wordt concordant bedekt door de Altena Groep of discordant door de Rijnland Groep. De formatie komt waarschijnlijk alleen voor ten zuidoosten van het Groningen Hoog en direct ten westen van de zoutpijler van Winschoten. De Keuper Formatie is slechts in twee boringen aangetroffen, namelijk Meeden-1 en Goldhoorn-1. In de boring Goldhoorn-1 (fig. 5.3) ontbreken de bovenste laagpakketten.

In het uiterste zuidoosten van het kaartbladgebied bereikt de Keuper Formatie de grootste dikte, van waarschijnlijk ruim 700 m. Daar de formatie hier niet is aangeboord is de opbouw niet bekend. Vermoedelijk omvat hij meerdere zoutpakketten.

De Keuper Formatie heeft een Laat-Ladinien tot Carnien ouderdom.

De *Onder-Keuper Kleisteen* is opgebouwd uit groengrijze tot roodbruine kalkhoudende kleisteen. Deze kleisteen is plaatselijk anhydritisch en heeft siltsteen- en dolomietinschakelingen. De Onder-Keuper Kleisteen is moeilijk te onderscheiden van de Boven-Muschelkalk, maar de maximale gamma-ray waarde in de Onder-Keuper Kleisteen ligt iets hoger dan in de Boven-Muschelkalk en de akoestische snelheid is iets lager. De dikte bedraagt in de boring Goldhoorn-1 ca. 80 m (fig. 5.3).

De *Hoofd-Keuper Evaporiet* heeft een vergelijkbare lithologie als de *Onder-Keuper Kleisteen* maar heeft een iets hoger anhydrietgehalte en is aan de top schalie-achtig. Dit pakket vormt het equivalent van het steenzoutpakket dat in het zuidoosten van het kaartbladgebied is afgezet. De dikte is ± 70 m.

De *Rode Keuper Kleisteen* bestaat uit bontgekleurde kleisteen. Het pakket bereikt een dikte van ca. 20 m.

De *Dolomitische Keuper* is opgebouwd uit een afwisseling van lichtgekleurde kalksteen, dolomiet en kleisteenbanken. De afzettingen bereiken een dikte van 35 m.

De *Boven-Keuper Kleisteen* bestaat uit een ruim 10 m dikke bruine tot grijze silt- en kleisteen.

5.4 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De aan het eind van het Perm ingezette influx van klastisch materiaal zette zich voort in de Trias. Het ontbreken van de anhydritische inschakelingen, die in de bovenste Zechstein afzettingen nog veelvuldig voorkwamen, markeert het begin van de Trias afzettingen. Het Zuidelijk Perm Bekken (fig. 11.1), bleef in essentie bestaan gedurende de Trias. In dit bekken, dat dan ook wel het Permo-Triassisch Bekken wordt genoemd, vindt aan het einde van het Perm een regressie plaats waarna continentale, lacustriene afzettingen overheersen. Deze afzettingen worden sterk beïnvloed door zeespiegel-fluctuaties, waardoor verschillende sequenties zijn te onderscheiden. De sequenties vertonen een tendens naar een stijgende zeespiegel met een maximum tijdens de afzettingen van de mariene kalken behorende tot de Muschelkalk. Hierna begint opnieuw een regressieve fase. Aangenomen wordt dat de fluctuaties in de grondwaterspiegel te relateren zijn aan eustatische zeespiegelfluctuaties, zoals deze zijn gepubliceerd door Haq et al. (1987). Naast veranderingen in de waterspiegel zijn klimaatveranderingen en tektonische activiteit in het achterland van invloed geweest op de afwisseling en verbreiding van de zand- en kleistenen.

De *Onder-Bontzandsteen Formatie* heeft over het gehele gebied een zeer uniforme lithologie en dikte. Dit geeft aan dat de formatie is afgezet in een zeer uitgestrekte vlakte. Gezien het continentale karakter van de afzettingen, de goede correleerbaarheid in de regio en de fijnkorrelige samenstelling, vond de sedimentatie waarschijnlijk plaats in een lacustrien milieu. De oölieten in het Rogenstein Laagpakket vormden zich tijdens periodes van lage klastische influx en hogere stroming in brak, kalkrijk water (Peryt, 1975; Brüning, 1986). De afwisseling van groen- en roodkleuring is een aanwijzing voor afwisselend reducerende en oxyderende omstandigheden hetgeen wijst op een fluctuerende waterspiegel.

Uit de uniformiteit van de *Hoofdkleisteen* is af te leiden dat in het begin van de Vroeg-Trias het Groningen Hoog als afzonderlijk tektonisch element geen rol speelde.

De *Hoofd-Bontzandsteen* vormde, samen met de *Solling Formatie* vier cyclische herhalingen van zand- en kleisteen: de *Volpriehausen*, *Detfurth*, *Hardeggen* en de *Solling Formatie*. De cycliciteit wijst op waterspiegelfluctuaties in een zeer vlak gebied. In de Trias in Nederland en Duitsland zijn (kleine) discordanties aangetoond onder de *Volpriehausen*, de *Detfurth* en de *Solling Formatie* (Röhling, 1991; Geluk & Röhling, in prep). Dit steunt de opvatting dat deze afzettingen drie sequenties vertegenwoordigen. In het kaartbladgebied is alleen de *Basis Solling* discordantie prominent aanwezig. Elke cyclus bestaat uit een basaal zandpakket, dat is afgezet in een riviersysteem, en een transgressieve lacustriene kleisteenafzetting. De opeenvolgende riviersystemen prograderen in een noordwaartse richting en representeren periodes van lage waterspiegelstand. Zanddistributiestudies geven

aanvoerrichtingen vanuit het zuiden aan. De depositionele dikte van met name de fluviatiele afzettingen neemt duidelijk af in de richting van de Netherlands Swell maar toe in de richting van het Eems Diep. Na de afzetting van de Hardegse Formatie zette de opheffing van de Netherlands Swell ook binnen het kaartbladgebied goed door en vond erosie plaats. De erosie op het Groningen Hoog heeft plaatselijk tot aan de Onder-Bontzandsteen Formatie ingesneden. De tektonische fase die aan de erosie ten grondslag lag, heeft waarschijnlijk in een groot deel van het gebied de halokinese versterkt (zie paragraaf 11.4).

Met de sedimentatie van de Solling Formatie begint er een periode waarin meerdere mariene transgressies plaatsvonden. Een bewijs hiervoor zijn de evaporiet- en kalksteenafzettingen. De evaporieten in de Röt Formatie vormden zich door indamping van het zeewater tijdens een regressie of stilstand. Het verhoogde carbonaat-gehalte in het bovenste deel van de Röt Formatie duidt op een nieuwe transgressie. Deze transgressie had tot gevolg dat de brongebieden van klastische sedimenten grotendeels door de zee werden bedekt. Hierdoor kon het carbonaatgehalte tijdens de afzetting van de Muschelkalk Formatie verder toenemen. In het kaartbladgebied werden mergels met kalksteen- en dolomietinschakelingen afgezet. Meer naar de rand van het Permo-Triassisch Bekken (fig. 11.1), in het zuiden van Nederland, werd in een ondiepe zee kalksteen afgezet. De Muschelkalk Evaporiet heeft een kleinere verbreiding en is dunner dan de Röt Evaporiet. Na de evaporietafzetting werden er weer mergelige, ondiep-mariene kleien afgezet.

Aan het einde van de Muschelkalk vond een regressie plaats waarna de Keuper Formatie afgezet werd. Doordat het brongebied van het klastisch materiaal meer in de nabijheid kwam is de Keuper Formatie zandiger en de afzetting van dikke pakketten steenzout bleef beperkt tot kleine bekkens ten noorden van Nederland. Daar is de formatie opgebouwd uit een ritmische afwisseling van kleisteen- en evaporietpakketten. De afzettingen in het kaartbladgebied vonden plaats onder continentale en deltaïsche omstandigheden.

Tijdens de afzetting van de Keuper Formatie vond er een aan de Vroeg-Kimmerische tektonische fase gerelateerde opheffing plaats. De hiermee gepaard gaande erosie, heeft in het kaartbladgebied het bovenste deel van de Trias verwijderd. Op een klein gebied in het zuidoosten na is, door de sterke erosie aan het einde van de Jura als gevolg van de Laat-Kimmerische fase, deze discordantie in het kaartbladgebied niet meer aantoonbaar.

6 Altena Groep

6.1 Stratigrafie

Na een korte periode van erosie in de Laat-Trias leidde een transgressie tot hernieuwde sedimentatie. Gedurende Laat-Trias (Rhaetien) en Vroeg- en Midden-Jura werden sedimenten van de Altena Groep afgezet. In het kaartbladgebied is de Altena Groep alleen aanwezig ten zuidoosten van het Groningen Hoog (Kaarten 7 & 8). Deze voorkomens kunnen gezien worden als de noordelijke uitlopers van een veel groter voorkomen van de groep in het Nedersaksisch Bekken, ten oosten en zuiden van het kaartbladgebied (fig. 1.8). Het voorkomen van de Altena Groep is sterk beïnvloed door halokinese en is gerelateerd aan depletiegebieden tussen de grote zoutaccumulaties van Winschoten, De Eeker, Klein-Ulsda, Landschapspolder en de, ten zuiden van het kaartbladgebied gelegen, structuur Zuidwending (fig. 11.2). De binnen het kaartblad voorkomende afzettingen van de Altena Groep omvatten, de mariene, kalkige kleien en schalies van de Sleen en Aalburg Formatie, de bitumineuse Posidonia Schalie Formatie en het onderste laagpakket van de Werkendam Formatie. In het Nedersaksisch Bekken omvat de Altena Groep tevens de Brabant Formatie. In het resterend kaartbladgebied is de Altena Groep geërodeerd tijdens de Mid- en Laat-Kimmerische opheffingsfase.

De stratigrafische opbouw van de Altena Groep wordt aan de hand van de boring Meeden-1 geïllustreerd (fig. 6.1).

De basis van de Altena Groep ligt op een diepte tussen de 1300 en 2100 m (Kaart 7). De dikte varieert van 0 tot 500 m (Kaart 8). Deze variatie is voornamelijk het gevolg van erosie gekoppeld aan zoutvloeï.

De Altena Groep bedekt, gescheiden door een klein hiaat, de Boven-Germaanse Trias Groep en wordt discordant bedekt door de Rijnland Groep en, waar deze voorkomt, door de Nedersaksen Groep (fig. 7.1).

De ouderdom van de Altena Groep in het kaartbladgebied is Rhaetien tot Aalenien.

6.1.1 Sleen Formatie

De Sleen Formatie bestaat uit grijze tot groengrijze en soms roodbruine, mergelige, kleisteen met schalie en siltsteen-inschakelingen. De afzettingen komen voor in het gebied ten zuidoosten van het Groningen Hoog (Kaart 7). De basis van de Sleen Formatie wordt gekenmerkt door een veel lagere akoestische snelheid dan de onderliggende anhydritische Keuper laagpakketten (fig. 6.1). Dit grote contrast is op de seismiek te herkennen aan een sterke reflectie in een relatief monotoon pakket met lage amplitudes.

De dikte van de Sleen Formatie bedraagt 34 m in de boring Meeden-1 (fig. 6.1). Deze dikte is groter dan de gemiddelde dikte in de boringen ten zuiden van Meeden-1. Dit is waarschijnlijk een sedimentaire verdikking ten gevolge van vroege zoutdepletie.

De formatie ligt met een klein hiaat op de Boven-Germaanse Trias Groep, en wordt concordant bedekt door de Aalburg Formatie of discordant door de Onder-Krijt sedimenten van de Rijnland Groep.

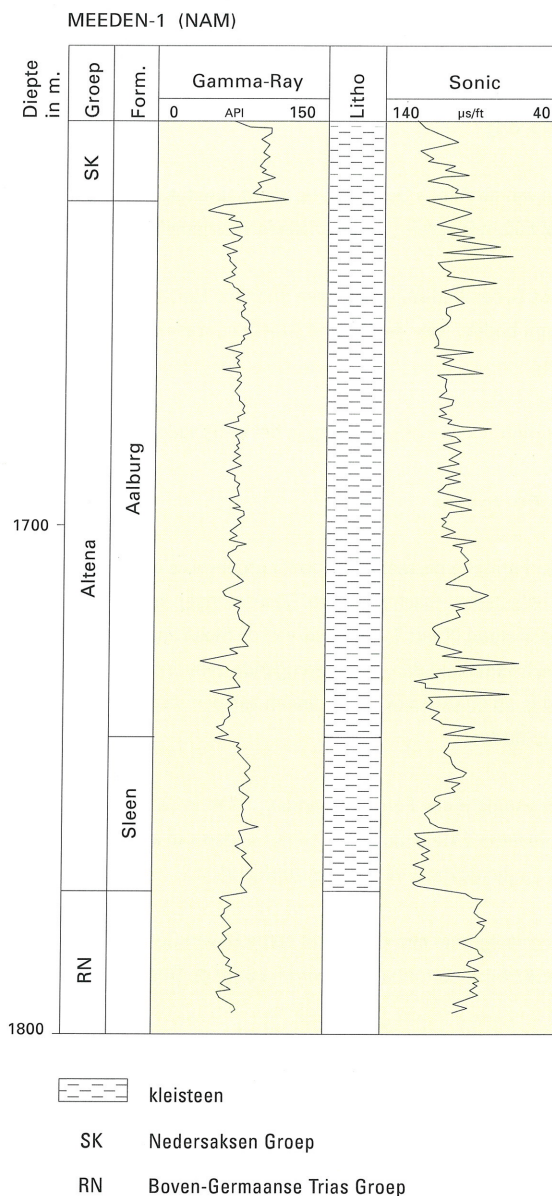
De ouderdom van de formatie is Rhaetien.

6.1.2 Aalburg Formatie

De Aalburg Formatie bestaat uit een monotoon pakket mariene kalkige kleistenen en schalies. Deze zijn grijs tot donkergrijs, en hebben donkergrijze siltsteen inschakelingen. Daarnaast komen, met name in het onderste deel van de formatie, enkele fijne zandsteen- en kalksteenbanken voor. De formatie is op de logs te onderscheiden door de lagere gamma-ray en hogere akoestische snelheid dan de Sleen Formatie (fig. 6.1). Vooral de basis van de Aalburg Formatie heeft pieken met lage gamma-ray waarden en hoge akoestische snelheden ten gevolge van de bovengenoemde kalksteenbanken.

De Aalburg Formatie is niet duidelijk herkenbaar op de seismiek. De formatie is, gezien de grote dikte in de boring Meeden-1 (123 m, fig. 6.1.), waarschijnlijk aanwezig in hetzelfde verbreidingsgebied als de Sleen Formatie (fig. 6.1).

Figuur 6.1 Stratigrafische indeling en logbeeld van de Altena Groep in de boring Meeden-1.



In het grootste deel van het verbreidingsgebied ligt de Rijnland Groep discordant op de Aalburg Formatie. Plaatselijk wordt de formatie echter concordant bedekt door de Posidonia Schalie Formatie of discordant door de Nedersaksen Groep (fig. 7.1).

De ouderdom van de Aalburg Formatie is Hettangien tot Pliensbachien.

6.1.3 Posidonia Schalie Formatie

De Posidonia Schalie Formatie is een donkergrijze tot zwarte bitumineuze schalie, die zich op logs van de omliggende eenheden onderscheidt door de hoge uitslagen op de gamma-ray en weerstandlogs. Vlak boven de formatie worden nog enkele bitumineuze niveaus aangetroffen in de Werkendam Formatie.

De formatie manifesteert zich als een duidelijk herkenbare sterke reflectie op de seismiek. De reflectie wordt veroorzaakt door de lage akoestische snelheid van de aanwezige bitumen in de schalie. De schalie vormt door deze bitumen een belangrijk oliemoedergesteente. Het voorkomen van de Posidonia omvat het verbreidingsgebied van de Werkendam Formatie. De Posidonia is alleen aangetroffen in enkele boringen ten zuiden van het kaartbladgebied. De afzettingsdikte bedraagt daar circa 25 m. De Posidonia wordt concordant bedekt door de Werkendam Formatie.

De Posidonia Schalie is afgezet tijdens het Toarcien.

6.1.4 Werkendam Formatie

De mariene, grijze, mergelige klei van de Werkendam Formatie wordt onderverdeeld in de Onder-, Midden- en Boven-Werkendam Laagpakketten. Slechts het onderste laagpakket komt in een zeer beperkt gebied in het zuidoosten van het kaartbladgebied voor. Deze afzettingen zijn hier tijdens de Mid- en Laat-Kimmerische tektonische fasen bewaard gebleven in een kleine randsyncline ten zuiden van de zoutrug Klein-Ulsda. Het mariene *Onder-Werkendam Laagpakket* bestaat uit een, soms kalkige en siltige, grijze kleisteen. Deze is te vergelijken met de Aalburg Formatie. De maximale dikte is af te leiden uit de seismiek en bedraagt ongeveer 100 m. De complete formatie bereikt in het ten zuiden gelegen Nedersaksisch Bekken een dikte van ongeveer 400 m. De Werkendam Formatie bedekt concordant de Posidonia Schalie Formatie en wordt discordant bedekt door de Rijnland Groep. Mogelijk is op enkele plaatsen de Nedersaksen Groep discordant aanwezig tussen de Werkendam en de Rijnland Groep.

De Onder-Werkendam heeft een ouderdom van Toarcien tot Aalenien.

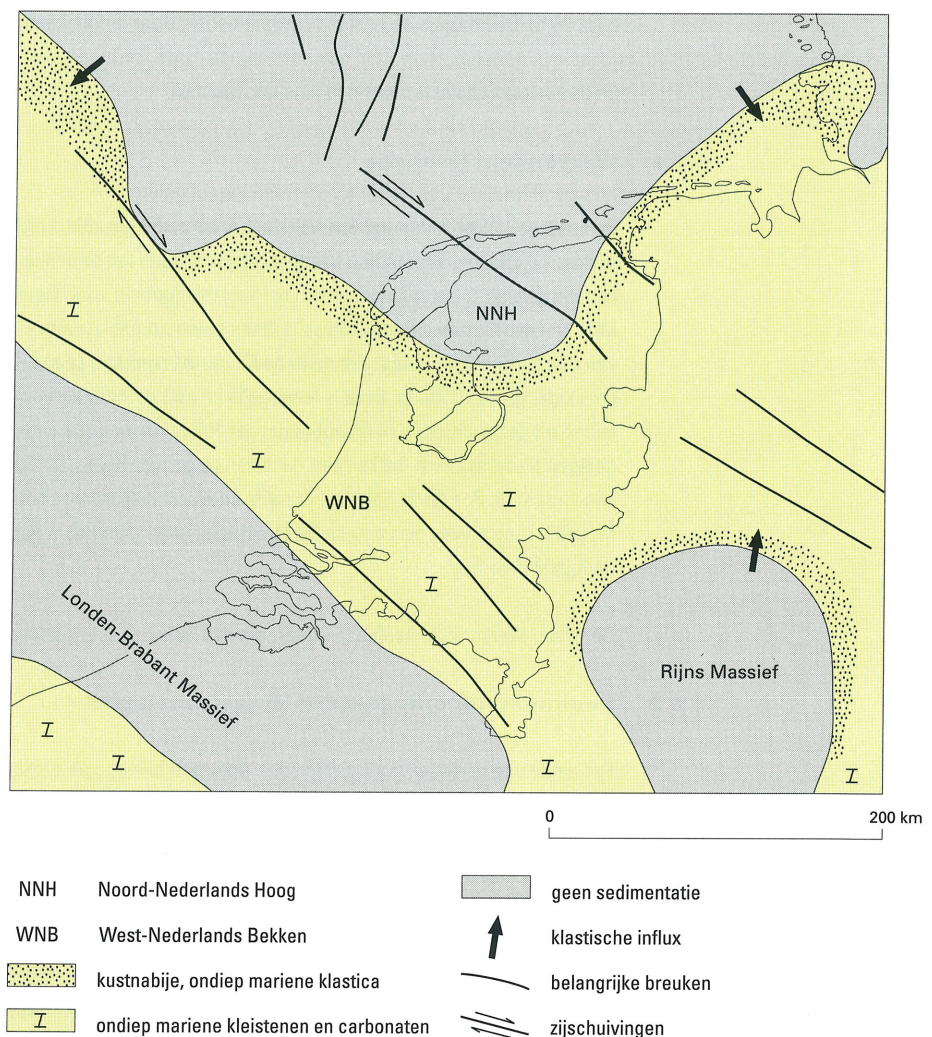
6.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Het einde van de Trias wordt gekenmerkt door een belangrijke omslag in afzettingsmilieu. Na een lange tijd van continentale omstandigheden leidde een transgressie tot de vorming van een open-mariene afzettingsmilieu dat zich over een groot deel van West- en Centraal-Europa uitstrekte. Een kleine regressieve periode tijdens het Laat-Rhaetien zorgde ervoor dat de top van de Sleen Formatie een meer lagunair karakter kreeg (Haanstra, 1963). Hierna verdiepte het bekken zich weer waarna de open-mariene sedimenten van de Aalburg Formatie werden afgezet. Het Vroeg-Toarcien wordt gemarkeerd door sedimenten afgezet onder euxinische omstandigheden. Onder deze omstandigheden, veroorzaakt door de stratificatie van warm, zout water uit de Tethys-zee en koud Arctisch

zeewater, werd de bitumineuze Posidonia Schalie Formatie afgezet. Open-mariene condities werden weer hersteld vanaf het Toarcien tot het Laat-Bajocien toen de Werkendam Formatie werd afgezet.

De goede correleerbaarheid van de Aalburg Formatie in Oost-Nederland geeft aan dat er tijdens de vroege Jura geen of weinig regionale differentiatie in de daling van het bekken heeft plaatsgevonden. Pas in de Midden-Jura (Bajocien-Bathonien) werd het bekken ondieper, en kleiner, waarschijnlijk in samenhang met de opheffing van de Centrale Noordzee Dome (Ziegler, 1990). Het is aannemelijk dat het kaartbladgebied vanaf deze periode buiten het bekken lag en blootstond aan erosie (fig. 6.2). De Brabant Formatie, de jongste formatie van de Altena Groep, is hier dan waarschijnlijk ook nooit afgezet. Tijdens de Laat-Jura breidde het hoog zich, als gevolg van de eerste hoofdpuls van de Laat-Kimmerische tektonische fase, verder uit in oostelijke richting (Ziegler, 1990; fig. 7.2).

Figuur 6.2 Paleogeografische kaart van Nederland en het omliggende gebied ten tijde van de Midden-Jura (Bajocien-Bathonien) (naar Ziegler, 1990).



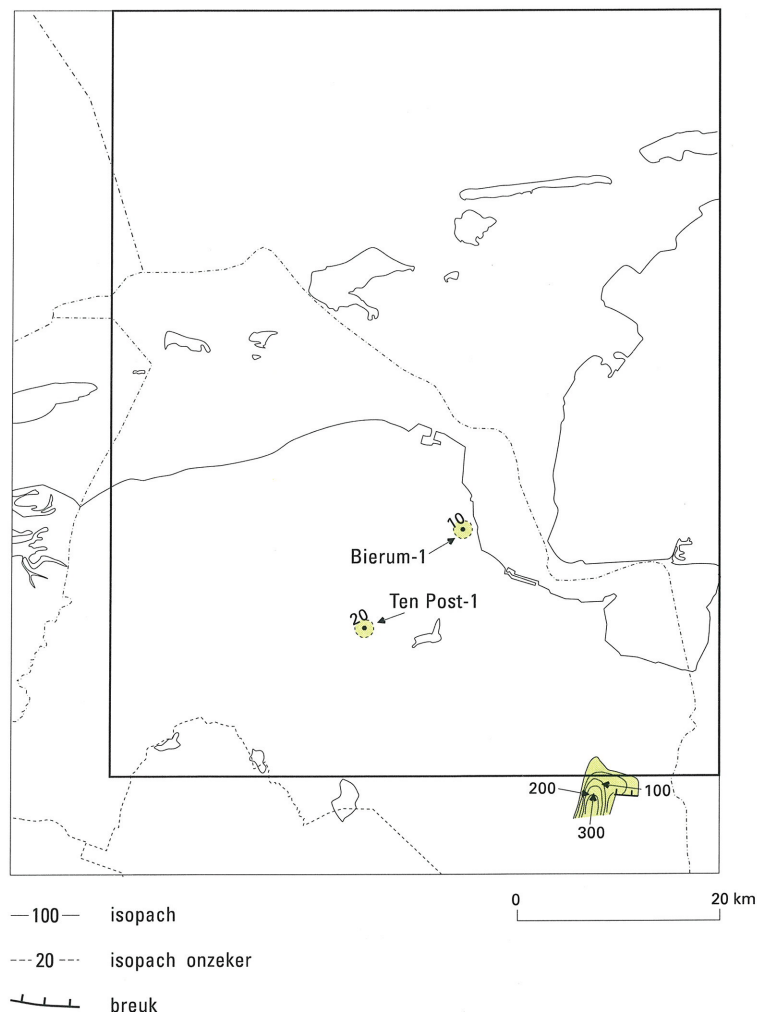
7 Nedersaksen Groep

7.1 Stratigrafie

De kalkhoudende kleistenen, mergels en evaporieten van de Nedersaksen Groep zijn voornamelijk in het Nedersaksisch Bekken, ten oosten en zuiden van het kaartbladgebied afgezet tijdens de Laat-Jura en het vroegste Krijt. Binnen het kaartbladgebied komt de Nedersaksen Groep voor in de door zoutdepletie gevormde depressie tussen de zoutpijler van Winschoten en de zoutrug van Klein-Ulsda. Daarnaast is zij in een tweetal boringen op het Groningen Hoog aangetoond (Bierum-1, Ten Post-1, fig. 7.1 & 8.1; RGD, 1992b). In de twee door zoutdepletie ontstane lokale depressies werd een terrestrische fijnkorrelige zandsteen aangetroffen onder de mariene afzettingen van het Onder-Krijt. Het gaat hier om de *Weiteveen Formatie*, de jongste afzettingen van de Nedersaksen Groep van Valanginien-ouderdom (RGD, 1992b). Het is echter op basis van deze voorkomens niet mogelijk uitspraken te doen omtrent de oorspronkelijke verbreiding, dikte en samenstelling van de Nedersaksen opeenvolging op het Groningen Hoog.

De basis van de Nedersaksen Groep ligt hier op een diepte van 1800 tot 2000 m. De dikte bedraagt maximaal 50 m.

Figuur 7.1 Diktekaart van de Nedersaksen Groep, gebaseerd op boringen en seismiek. Het zuidelijk voorkomen is een uitloper van het Nedersaksisch Bekken, verder zijn er geïsoleerde voorkomens aangetoond in de boringen Ten Post-1 en Bierum-1.



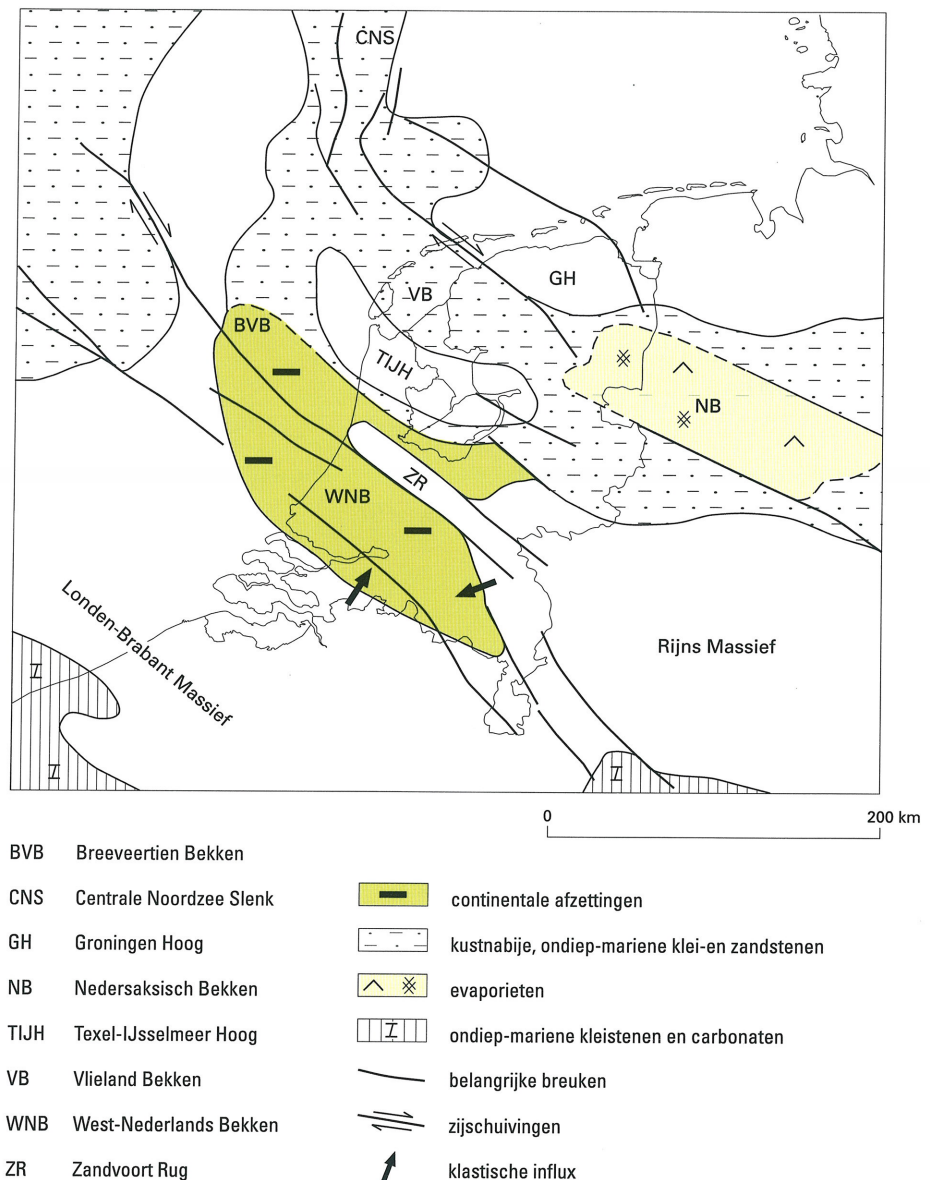
Het voorkomen tussen Winschoten en Klein-Ulsda is niet aangeboord. Informatie uit enkele boringen in Drenthe ten zuiden van het kaartbladgebied wijst er op dat de opeenvolging hier waarschijnlijk de onderste 50 m van de Weiteveen Formatie omvat. Dit is een grijze tot donkergrijze mergelige kleisteen.

De Nedersaksen Groep is afgezet vanaf het Kimmeridgien tot mogelijk in het vroegste Valanginien.

7.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De in het kaartbladgebied voorkomende afzettingen van de Nedersaksen Groep maken deel uit van een veel groter voorkomen in het Nedersaksisch Bekken. Het overige deel van het kaartbladgebied lag gedurende het Kimmeridgien tot Valanginien waarschijnlijk boven de zeespiegel (fig. 7.2). Mogelijk

Figuur 7.2 Paleogeografische kaart van Nederland en het omliggende gebied tijdens de Laat-Jura (naar Ziegler, 1990).



werden lokaal op het hoog nog enige sedimenten afgezet (Ten Post-1 en Bierum-1). Bij gering reliëf van het hoog zou het periodiek onder water hebben kunnen staan. De Laat-Kimmerische erosie heeft echter vrijwel alle sporen hiervan verwijderd.

De afzetting in het Nedersaksisch Bekken vond plaats onder voornamelijk lacustriene omstandigheden waar met tussenpozen mariene en hypersaliene condities heersten. De influx van siliciclastica was gering doordat de noordelijk aangrenzende hogen voornamelijk bedekt waren met de kalkige kleistenen van de Onder-Jura. De in het kaartbladgebied voorkomende sedimenten van de Nedersaksen Groep vormen de noordelijke bekkenrand-afzettingen van het Nedersaksisch Bekken. Hoogst waarschijnlijk bestaat de Nedersaksen Groep hier uit incomplete secties met intraformationele hiaten. De opeenvolging is door synsedimentaire zoutbewegingen variabel in dikte.

Als gevolg van de Laat-Kimmerische tektonische fase, tijdens de Laat-Jura en het vroegste Krijt, werd het kaartbladgebied opgeheven en geërodeerd. Deze erosie is ten zuidoosten van het Groningen Hoog, in de door zoutdepletie ontstane depressies, beperkt gebleven tot het jongste deel van de Nedersaksen Groep. Dit in tegenstelling tot het Groningen Hoog, waar de erosie plaatselijk tot in de Zechstein Groep reikte. In het centrum van het Nedersaksisch Bekken vond ononderbroken sedimentatie plaats.

8 Rijnland Groep

8.1 Stratigrafie

De Rijnland Groep bestaat in het kaartbladgebied voornamelijk uit mergelige kleisteen en siltige mergels. Zeer plaatselijk bestaat de basis van de Rijnland Groep uit zandsteen. De sedimenten van de Rijnland Groep werden afgezet in een aanvankelijk ondiep, maar geleidelijk dieper wordend, open marien milieu. De groep wordt onderverdeeld in de Vlieland Subgroep, die bestaat uit de Vlieland Zandsteen Formatie en Vlieland Kleisteen Formatie en de jongere Holland Formatie.

Afzettingen van de Rijnland Groep komen in nagenoeg het gehele kaartbladgebied voor (Kaart 10), behalve boven de zoutkoepels Pieterburen en Klein-Ulsda. Boven de overige zoutaccumulaties kunnen in de opeenvolging verschillende hiaten optreden. De basis van de groep is diachroon. Door transgressies over het Groningen Hoog varieert de ouderdom van Vroeg-Valanginien tot Laat-Albien (RGD, 1992c). De Rijnland Groep rust, door erosie voorafgaande aan de afzetting, discordant op gesteente van verschillende ouderdom (fig. 1.8). Op het Groningen Hoog betreft dit de Onder-Germaanse Trias Groep en de Zechstein Groep boven de zoutstructuren. In de Lauwerszee Trog en het Eems Diep bedekt de Rijnland Groep de Boven-Germaanse Trias Groep, terwijl in het uiterste zuidoosten Vroeg- en Laat-Jura afzettingen worden afgedekt. Lokaal kunnen op het Groningen Hoog sedimenten van Laat-Jura ouderdom (Nedersaksen Groep) direct onder de Rijnland Groep voorkomen.

De dikte van de Rijnland Groep is over het grootste deel van het kaartbladgebied 50 tot 100 m. Boven zoutstructuren of in randsynclines wordt de dikte respectievelijk kleiner of groter. Naar het noordwesten, in de Lauwerszee Trog, neemt de dikte toe tot ruim 200 m.

De diepte van de basis van de Rijnland Groep ligt op het Groningen Hoog gemiddeld op 1850 m, boven de zoutstructuren ligt de basis ondieper. In de Lauwerszee Trog ligt de basis van de Rijnland Groep op een maximale diepte van 2900 m (Kaart 9).

De ouderdom van de Rijnland Groep is Vroeg-Valanginien tot en met Albien. In de groep komen tenminste drie hiaten voor.

8.1.1 Vlieland Subgroep

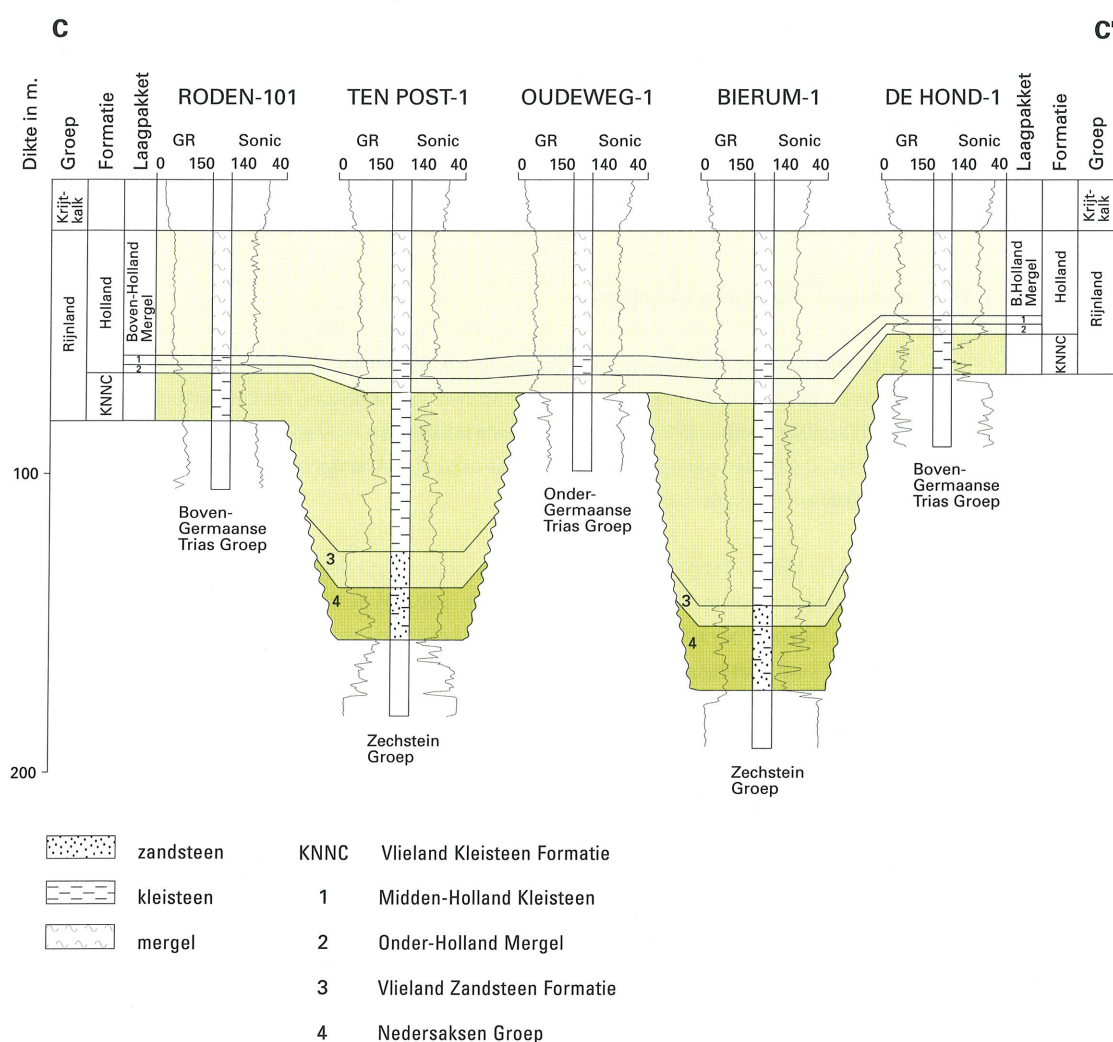
De Vlieland Subgroep is in bijna het gehele kaartbladgebied aanwezig, met uitzondering van enkele gebieden boven zoutaccumulaties. De verbreiding van de Vlieland Subgroep komt overeen met die van de Rijnland Groep (Kaart 9). De dikteverdeling vertoont nagenoeg hetzelfde beeld als de diktekaart van de complete Rijnland Groep (Kaart 10), met verdikkingen in de randsynclines en verdunningen boven zoutstructuren. De maximale dikte bedraagt 100 m. De diktevariatie wordt enerzijds veroorzaakt doordat de Vlieland Subgroep waarschijnlijk het bestaande reliëf heeft opgevuld en anderzijds door de differentiële erosie van de bovenzijde. In figuur 8.1 is het paleoreliëf af te leiden uit de verschillende ouderdommen van de Vlieland, direct boven het discordantievlak.

Door sterke erosie, voorafgaande aan de afzetting van de Vlieland Subgroep, liggen de sedimenten op verschillende formaties, zoals aangegeven op Kaart 14, de afgedekte geologische kaart beneden de basis van de Rijnland Groep. De formatie wordt in het algemeen concordant bedekt, via een hiaat, door afzettingen van de Holland Formatie. Aan de rand van zoutaccumulaties is het contact plaatselijk discordant. Dit is het gevolg van de erosie die heeft plaatsgevonden boven zoutaccumulaties, veroorzaakt door de stijging van het Zechstein zout.

De ouderdom van de subgroep is Vroeg-Valanginien tot Barremien.

8.1.1a Vlieland Zandsteen Formatie

De Vlieland Zandsteen Formatie bestaat in het kaartbladgebied uit het *Friesland Zandsteen Laagpakket*. Dit pakket is slechts enkele keren aangeboord, en meestal zeer dun (minder dan 5 m). Mogelijk is de zandsteen op het Groningen Hoog alleen in depressies van het paleoreliëf afgezet. Een andere mogelijkheid is dat zij in een groot gedeelte van het gebied afgezet is en vervolgens geërodeerd, waarbij zij alleen in randsyclines of lokale zoutdepletiegebieden bewaard is gebleven. Het hiaat tussen



Figuur 8.1 Stratigrafisch profiel C-C' van de Rijnland Groep aan de hand van palynologisch onderzoek en het logbeeld van de boringen Roden-101, Ten Post-1, Oudeweg-1, Bierum-1 en De Hond-1 (RGD, 1992b,c). Dit ZW-NO profiel laat verschillende

hiaten zien die het gevolg zijn van non-depositie perioden en mogelijke erosie. De basis van de Rijnland Groep vertoont een variatie in ouderdom dat indicatief is voor de aanwezigheid van een paleoreliëf. In de boringen Ten Post-1 en Bierum-1 zijn onder

de Vlieland Subgroep relicten van de Nedersaksen Groep gevonden. (N.B. de afstand tussen de boringen is niet op schaal). Voor de ligging van het profiel zie figuur 1.3.

de Friesland Zandsteen en de Vlieland Kleisteen Formatie in de boring Ten Post-1 wijst inderdaad op een mogelijke periode van erosie. Waarschijnlijk komt de Friesland Zandsteen wel in het gebied van de huidige Waddenzee voor.

De Friesland Zandsteen bestaat in het kaartbladgebied uit een afwisseling van groengrijze en donkergrijze, soms mergelige en glauconitische klei-, silt- en zeer fijne zandsteen. Dit in tegenstelling tot in de provincie Friesland, waar de Friesland Zandsteen goed ontwikkelde zandstenen bevat die belangrijke reservoirgesteenten vormen. Alleen in de boring Ten Post-1 is een schoon, basaal zandsteenpakket aangetroffen van 12 m dik (fig. 8.1) dat te vergelijken is met de zandstenen in de provincie Friesland.

De overgang van de Friesland Zandsteen naar de Vlieland Kleisteen Formatie is vrij abrupt en is goed herkenbaar op gamma-ray en sonic logs (fig. 8.1). De dikte van de zandsteen is maximaal 35 m.

De ouderdom van de Friesland Zandsteen is waarschijnlijk Vroeg-Valanginien. De top heeft een ouderdom van Vroeg- tot Midden-Valanginien (Herngreen et al., 1991; RGD, 1992c).

8.1.1b Vlieland Kleisteen Formatie

De *Vlieland Kleisteen Formatie* bestaat uit schalie en kleisteen die soms siltig, soms mergelig is en die verschillende kleuren bruin, groen of grijs kan hebben. In de kleisteen, net boven de basis, komt een klein hiaat voor. Hierboven kunnen ijzerhoudende kleisteen en oolieten voorkomen. Deze zijn kenmerkend voor een periode van non-depositie en voor een hardground. Aan de top van de eenheid is de kleisteen enigszins mergelig.

De formatie komt in het gehele kaartbladgebied voor met uitzondering van de gebieden boven grote zoutaccumulaties. De maximaal aangeboorde dikte is 68 m in de boring Bierum-1 (fig. 8.1). De Vlieland Kleisteen Formatie bevat een duidelijk hiaat; onder het hiaat is de ouderdom Midden-Valanginien en boven het hiaat Laat-Hauterivien tot Barremien (RGD, 1992c).

8.1.2 Holland Formatie

De Holland Formatie is de jongste eenheid van de Rijnland Groep. De formatie bestaat uit grijze en groene, soms geelbruine mergel en mergelige kleisteen. De formatie is opgedeeld in drie laagpakketten die redelijk goed te onderscheiden zijn op de gamma-ray en akoestische logs (fig. 8.1). Van oud naar jong zijn dit de Onder-Holland Mergel, de Midden-Holland Schalie en de Boven-Holland Mergel Laagpakketten.

De formatie komt, zij het niet altijd compleet, in nagenoeg het gehele kaartbladgebied voor. Boven de zoutpijler van Pieterburen en de zoutrug van Klein-Ulsda is de formatie afwezig. De diktetrend is vergelijkbaar met die van de gehele Rijnland Groep (Kaart 10). Ook van de Holland Formatie is de dikte sterk beïnvloed door zoutvloeit gedurende de afzetting. De maximaal aangeboorde dikte is 100 m in de boring Bolderij-1, de gemiddelde dikte op het Groningen Hoog is ± 60 m.

De Holland Formatie ligt, veelal met een hiaat (dat het hele Barremien kan omvatten), op de Vlieland Kleisteen Formatie (fig. 8.1). Rond grote zoutaccumulaties is het contact hoekdiscordant, als gevolg van erosie gerelateerd aan zoutvloeit. De Holland Formatie wordt concordant bedekt door de Texel Formatie van de Krijtkalk Groep. De afzettingen zijn van Aptien en Albien ouderdom, met een mogelijk hiaat dat het Laat-Aptien omvat.

De *Onder-Holland Mergel* bestaat uit een licht- tot donkergrijze, soms bruin- of gelig-gekleurde mergel, die belemnieten en schelpresten bevat. Aan de basis is in de onderzochte monsters een 5 m dik grijs, wit gelamineerd mergel/schalie pakket aangetroffen dat te vergelijken valt met de *Fischschiefer* uit het *Nedersaksisch Bekken* (RGD, 1992c).

De *Onder-Holland Mergel* is goed te onderscheiden van de *Vlieland Kleisteen Formatie* door het hogere carbonaatgehalte. Dit geeft een lage waarde op de gamma-ray log en een hoge waarde op de akoestische log (fig. 8.1). De maximaal doorboorde dikte van het laagpakket is 19 m (Froombosch-1), terwijl op het *Groningen Hoog* de gemiddelde dikte ± 10 m is. Het laagpakket heeft een Aptien ouderdom.

De *Midden-Holland Kleisteen* bestaat uit donkergrijze kleisteen met een gemiddelde dikte van 7 m. In de boring de *Bolderij-1* is een dikte aangeboord van 16 m.

De *Midden-Holland Kleisteen* ligt, gescheiden door een hiaat, op de *Onder-Holland Mergel*. Het contact met de *Boven-Holland Mergel* is concordant. De ouderdom is Vroeg-Albien.

De *Boven-Holland Mergel* bestaat uit grijze en groene mergels. De maximaal aangeboorde dikte bedraagt 65 m (*Heiligerlee-1*). De gemiddelde dikte van deze eenheid op het *Groningen Hoog* is circa 45 m. Het contact met zowel de *Midden-Holland Schalie* als met de bovenliggende *Krijtkalk Groep* is concordant. Het laagpakket heeft een ouderdom van Midden- tot Laat-Albien. Biostratigrafische dateringen en logcorrelaties doen vermoeden dat binnen de *Boven-Holland Mergel* meerdere (zeer) kleine hiaten voorkomen (RGD, 1992c).

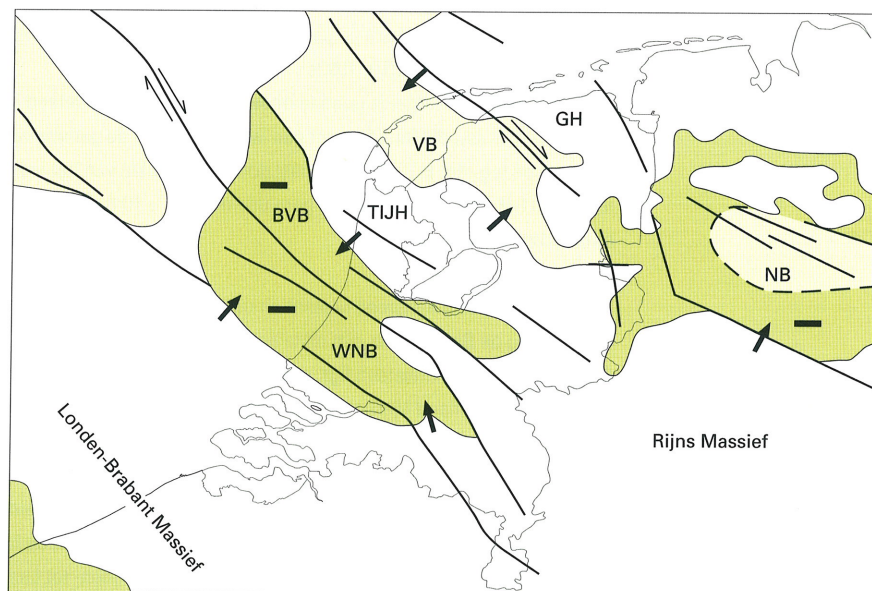
8.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Aan het begin van het Krijt bestond het grootste deel van het kaartblad uit een hoog gelegen gebied, dat zich naar het noordwesten uitstrekte (fig. 8.2a). Het Krijt wordt gekarakteriseerd door een transgressieve megasequentie, die in twee duidelijke sequenties is op te splitsen.

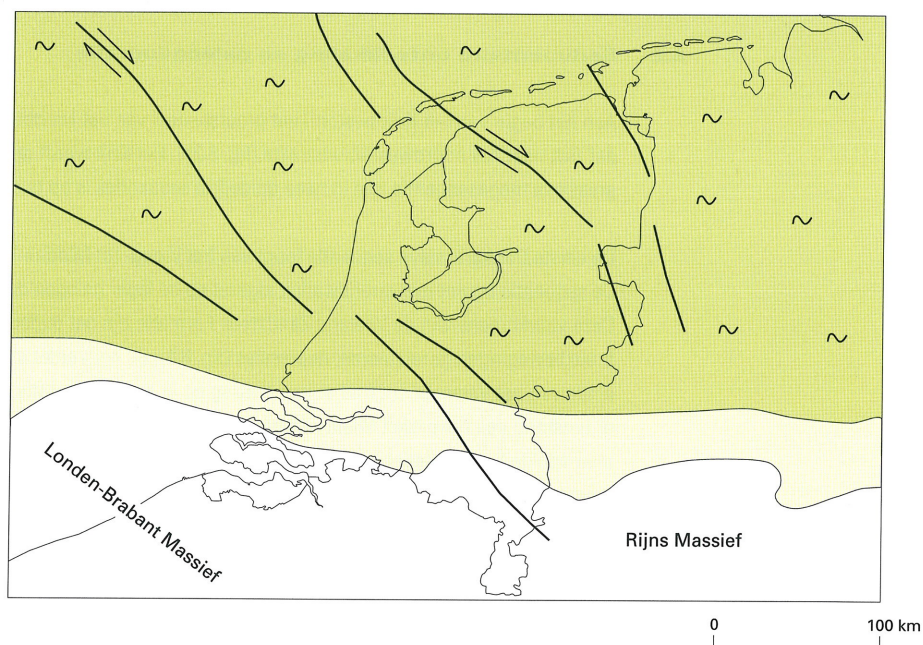
De eerste transgressieve sequentie loopt van het Vroeg- tot Midden-Valangien tot en met het Aptien. De sequentie begint met strandwallen afgezet op de lager gelegen delen van het *Groningen Hoog*. Deze voorkomens van de *Vlieland Zandsteen Formatie* zijn het oudst en het dikst in de, aan zout of breukbewegingen gerelateerde, depressies (fig. 8.1). Bij het verder stijgen van de zeespiegel, aan het einde van het Valangien, trad er een omslag op in de sedimentatie. De sedimenten werden fijner en er ontstond een dik pakket *Vlieland Kleisteen*. Mogelijk hield deze omslag verband met het overstromen van de brongebieden van het zand. De aanwezigheid van een substantiële hoeveelheid kalk in het jongste deel van de kleisteen (afkomstig van voornamelijk planktonische organismen) duidt op een overgang naar een open marien milieu. Lokaal heeft het door zoutbewegingen veroorzaakte reliëf invloed gehad op de dikteontwikkeling van de kleisteen. De eerste transgressie bereikte zijn hoogtepunt in het Aptien. Na een onderbreking in de sedimentatie (Laat-Barremien) werd de *Onder-Holland Mergel* afgezet, een laagpakket dat de meest open-mariene omstandigheden van deze transgressie reflecteert.

De tweede transgressieve sequentie begon in het Albien toen de stijging van de zeespiegel sneller was dan de tektonische opheffing (Crittenden, 1987). De grens tussen de twee transgressieve sequenties wordt gerelateerd aan de Asturische deformatie fase, en wordt gekenmerkt door een periode van non-depositie. De sedimentatie werd hervat met de *Midden-Holland Kleisteen* met aan de basis een vrij zandig transgressief traject. De open-mariene kenmerken keren terug in de *Boven-Holland Mergel*, de jongste eenheid van het Onder-Krijt (fig. 8.2b). De transgressieve sequentie zette zich voort tot het einde van het Laat-Krijt.

Figuur 8.2a Paleogeografische kaart van Nederland en het omliggende gebied ten tijde van het oudste Vroeg-Krijt (Ryazanien-Valanginien) (naar Ziegler, 1990).



Figuur 8.2b Paleogeografische kaart van Nederland en het omliggende gebied tijdens het latere Vroeg-Krijt (Aptien-Albien) (naar Ziegler, 1990).



BVB	Breeveertien Bekken		continentale afzettingen
GH	Groningen Hoog		ondiep-mariene kleistenen, mergels en carbonaten
NB	Nedersaksisch Bekken		kustnabije, ondiep-mariene klei- en zandstenen
TIJH	Texel-IJsselmeer Hoog		belangrijke breuken
VB	Vlieland Bekken		zijsschuivingen
WNB	West-Nederlands Bekken		klastische influx

9 Krijtkalk Groep

9.1. Stratigrafie

De Krijtkalk Groep bestaat uit een opeenvolging van goed gecementeerde, lichtgekleurde fijnkorrelige krijtkalken en mergelige kalken. Karakteristiek voor deze sedimenten is dat zij voornamelijk bestaan uit de kalkskeletten van planktonische en benthonische organismen (coccolieten, foraminiferen, sponzen, bryozoën, etc.) en dat zij weinig terrigeen materiaal bevatten. De Krijtkalk Groep wordt onderverdeeld in, van onder naar boven, de Texel Formatie en de Ommelanden Formatie (fig. 9.1).

Afzettingen van de Krijtkalk Groep komen in het gehele kaartbladgebied voor. De grootste dikte treft men aan in kleine, aan zoutvloed gerelateerde, depressies in het noordoosten van het kaartbladgebied (Kaart 12). De dikte bedraagt daar ruim 1000 m. Boven zoutstructuren zijn de afzettingen veel dunner, tot minder dan 100 m boven de zoutpijler van Pieterburen. Voorts valt op dat de gemiddelde dikte van de Krijtkalk Groep in het oostelijk deel van de Lauwerszee Trog kleiner is dan op het Groningen Hoog.

De basis van de Krijtkalk Groep ligt op het Groningen Hoog op een gemiddelde diepte van 1700 m en in de Lauwerszee Trog varieert de diepte van 1800 tot meer dan 2500 m (Kaart 11).

De ondergrens van de Krijtkalk Groep wordt gelegd aan de basis van de mergelige krijtkalk successie die concordant op de mergels van de Rijnland Groep ligt. De Krijtkalk Groep wordt discordant bedekt door de klastische sedimenten van de Noordzee Supergroep.

De ouderdom van de Krijtkalk Groep binnen het kaartbladgebied loopt van Cenomanien tot en met Maastrichtien. Uit de logcorrelaties van vier biostratigrafisch onderzochte boringen, Roden-101, Winsum-1, Stedum-1 en De Hond-1, blijkt de aanwezigheid van kleine hiaten en gecondenseerde sequenties (RGD, 1992d, fig. 9.1). Dit geldt met name boven zoutruggen (boring Winsum-1). Het Boven-Maastrichtien is waarschijnlijk alleen aanwezig in het noordoosten van het kaartbladgebied in de zoutdepletiegebieden (boring De Hond-1).

9.1.1 Texel Formatie

De Texel Formatie bestaat uit witte en lichtgrijze krijtkalk en mergelige kalk met plaatselijk inschakelingen van lichtgroene kalkmergel met glauconiet. Het bovenste deel van de Texel Formatie wordt gevormd door een ± 3 m dikke, zwarte schalielaag, het *Plenus Mergel Laagpakket* (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1995). Dit laagpakket is over grote afstanden goed te vervolgen en goed te herkennen aan een markante piek op de gamma-ray en sonic log (fig. 9.1).

De Texel Formatie is in het gehele gebied aanwezig. De dikte varieert op een zelfde manier als die van de gehele Krijtkalk Groep met grotere diktes in zoutdepletiegebieden en gecondenseerde sequenties boven zoutstructuren. De gemiddelde dikte in het kaartbladgebied is 50 m.

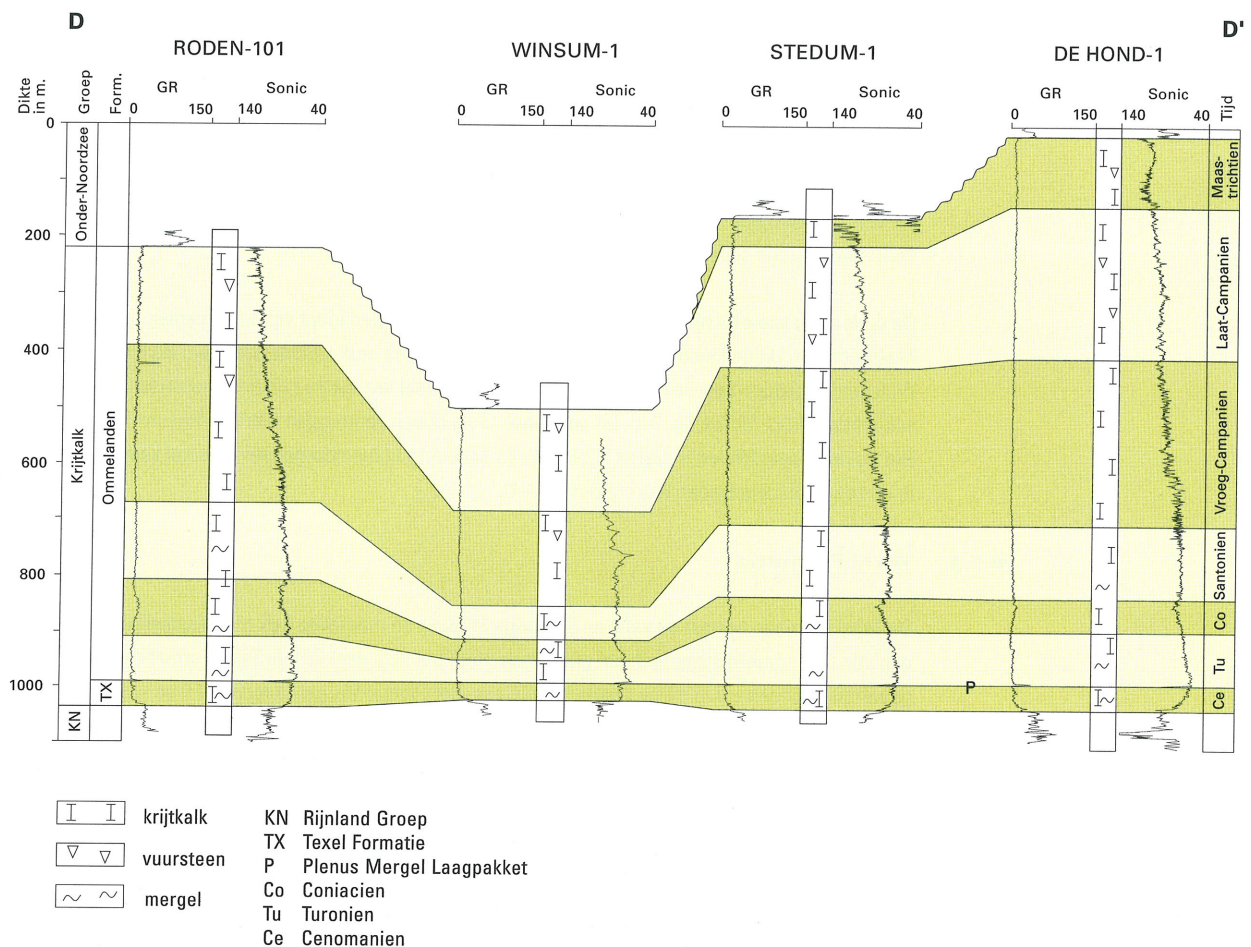
De formatie wordt concordant bedekt door de Ommelanden Formatie. De ouderdom van de formatie is Cenomanien, waarbij moet worden opgemerkt dat in de vier biostratigrafisch onderzochte boringen voornamelijk het oudste Cenomanien is aangetroffen (RGD, 1992d).

9.1.2 Ommelanden Formatie

De Ommelanden Formatie bestaat voornamelijk uit witte tot lichtgrijze krijtkalk, met kalksteen banken en enige mergelige inschakelingen. Voorts komen, met name aan de top, meerdere niveaus van laagparallel gerangschikte witte tot bijna zwarte vuursteenconcreties voor. In tegenstelling tot de

gamma-ray log, die heel monotoon van karakter is, veroorzaken de vuursteenconcreties een sterk getand patroon op de sonic log (fig. 9.1). Hoewel het monotone lithologische karakter van de formatie het moeilijk maakt een karteerbare onderverdeling van de Ommelanden Formatie te maken, lijkt het mogelijk op grond van de sonic log correlaties te maken (fig. 9.1).

Binnen het kaartbladgebied varieert de dikte van de formatie zeer sterk. Boven zoutstructuren komen diktes voor van minder dan 100 m. Daarentegen bereikt de Ommelanden Formatie in het noordoosten van het kaartbladgebied in de zoutdepletiegebieden een dikte van meer dan 1000 m. In het zuidoostelijke deel van de Lauwerszee Trog heeft de formatie een gemiddelde dikte die lager is dan de gemiddelde dikte op het Groningen Hoog.



Figuur 9.1 Stratigrafisch profiel D-D' van de Krijt-kalk Groep aan de hand van palynologisch onderzoek (RGD, 1992d) en het logbeeld, gamma-ray en sonic log, van de boringen Roden-101, Winsum-1, Stedum-1 en De Hond-1.

Referentieniveau is de Plenus Mergel. In de sequentie van de boring Winsum-1 blijkt met name de verdunning van het Santonien en Vroeg-Campanien en later van het Maastichtien. De oorzaak hiervan ligt in het stijgen van de

onderliggende zoutstructuur gerelateerd aan de Subhercynische en Laramische tektonische fasen. Voor de ligging van het profiel zie figuur 1.3.

De formatie wordt aan de basis begrensd door de zwarte schalielaag, het Plenus Mergel Laagpakket. De top wordt discordant bedekt door de klastische afzettingen van de Tertiaire Noordzee Supergroep. Deze discordantie is het gevolg van de Laramische tektonische fase die gepaard ging met een lichte erosie. Hierdoor ontbreekt het Boven-Maastrichtien in bijna het gehele kaartbladgebied. Alleen in de noordoostelijke zoutdepletie gebieden is het Boven-Maastrichtien bewaard gebleven. De aanwezigheid van gecondenseerde sequenties en kleine hiaten kan middels logcorrelatie en seismostratigrafisch onderzoek aangetoond worden. De hiaten zijn vaak aan een trendomslag in de sonic log te herkennen (fig. 9.1) en worden door biostratigrafische dateringen onderbouwd (RGD, 1992d). De formatie heeft een Turonien tot Maastrichtien ouderdom.

9.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De eustatische zeespiegelstijging die reeds in het Albien was begonnen ontwikkelde zich gedurende het Laat-Krijt tot een mondiale transgressie (Pitman, 1978; Donovan & Jones, 1979). De kustlijn kwam zodoende steeds verder van het kaartbladgebied te liggen waardoor de influx van terrestrisch sediment sterk werd gereduceerd. Waarschijnlijk door een combinatie van het overspoelen van de brongebieden van klastische sedimenten en een explosieve ontwikkeling van organismen met een kalkskelet bestaan de Laat-Krijt afzettingen voornamelijk uit bioklastische bestanddelen. De overgang met de Holland Formatie is vrij abrupt.

De grote dikte van de Ommelanden Formatie is te danken aan de langdurige en continue pelagische regen van coccolieten. Een maximale afzettingsdiepte in de Krijtzee van 150-200 m is voorgesteld door Hancock & Scholle (1975). Binnen de algehele transgressie reflecteert de Plenus mergel echter een periode van maximale regressie en verhoogde aanvoer van terrestrisch materiaal. De binnen het kaartbladgebied bestaande dikteverschillen in de Texel en Ommelanden Formatie zijn voornamelijk het gevolg van aan tektonische activiteit gerelateerde synsedimentaire zoutbewegingen. De discordantie aan de basis van het Santonien en tijdens het Vroeg-Campanien zijn het gevolg van tektonische pulsen gedurende de Subhercynische fase. De discordantie aan de top van het Krijt reflecteert de opheffing van het gebied en de zeespiegelverlaging aan het einde van het Laat-Krijt en het begin van het Tertiair. De opheffing werd veroorzaakt door de Laramische tektonische fase en betekende het einde van de rustige sedimentatie van honderden meters bioklastica.

10 Noordzee Supergroep

10.1 Stratigrafie

De Noordzee Supergroep is opgebouwd uit kleien met enkele zandige inschakelingen en een zandig pakket aan de top. De supergroep is onderverdeeld in de Onder-Noordzee, Midden-Noordzee en Boven-Noordzee Groep, welke van elkaar worden gescheiden door hiaten. Figuur 10.1 geeft een stratigrafisch overzicht. De beschrijving van deze afzettingen is hoofdzakelijk gebaseerd op rapporten van de Rijks Geologische Dienst (1984).

De Noordzee Supergroep wordt in het gehele gebied aangetroffen. De ondergrens wordt bepaald door het discordante contact met de Krijt-kalk Groep. Het maaiveld geldt als bovengrens. De dikte van de supergroep is het grootst in de Lauwerszee Trog (1150-1650 m). Dit is beduidend groter dan op het Groningen Hoog (± 850 m). Deze regionale dikte wordt lokaal sterk verstoord door de zoutbewegingen. In het algemeen neemt de dikte van de Noordzee Supergroep af boven de zoutstructuren. Echter in inzakkingsstructuren, zoals boven de zoutstructuren van Winsum en Klein-Ulsda, bereikt de Noordzee Supergroep een dikte van meer dan 1000 m (Kaart 13). Boven de zoutpijler van Pieterburen is een dikte van slechts 157 m aangeboord (Kaart 13). In de Lauwerszee Trog (met name het deel in de Waddenzee) konden grote hoeveelheden Tertiaire en Kwartaire sedimenten accumuleren door het (syndementair) wegvloeien van het Zechstein zout, gesuperponeerd op de algemene daling van het gebied. Aan de

Figuur 10.1 Stratigrafisch overzicht van de Noordzee Supergroep. De hiaten worden met verticale arcering aangegeven

TERTIAIR	Periode		Groep	Formatie	W		O	Tekt. Fase
	KWARTAIR	Tijdvak			Lauwerszee Trog	Groningen Hoog		
	Pleistoceen en Holoceen			diversen	Diverse continentale en mariene afzettingen			
TERTIAIR	Plioceen	Boven-Noordzee	Oosterhout	Scheemda	Formatie van Oosterhout			Formatie van Scheemda
			Breda		Formatie van Breda			
	Oligoceen	M.-Noordzee	Veldhoven	Rupel	Klei van Boom			Zand van Berg
					Klei van Asse			
	Eoceen	Onder-Noordzee	Dongen	Landen	Mergel van Brussel			
					Klei van Ieper			
					Basale Tuffiet van Dongen			
	Paleoceen				Klei van Landen			

hand van de figuren 10.1 en 10.2 wordt de beschrijving van de opbouw van de Noordzee Supergroep toegelicht.

De afzettingen van de Noordzee Supergroep zijn van Tertiaire en Kwartaire ouderdom.

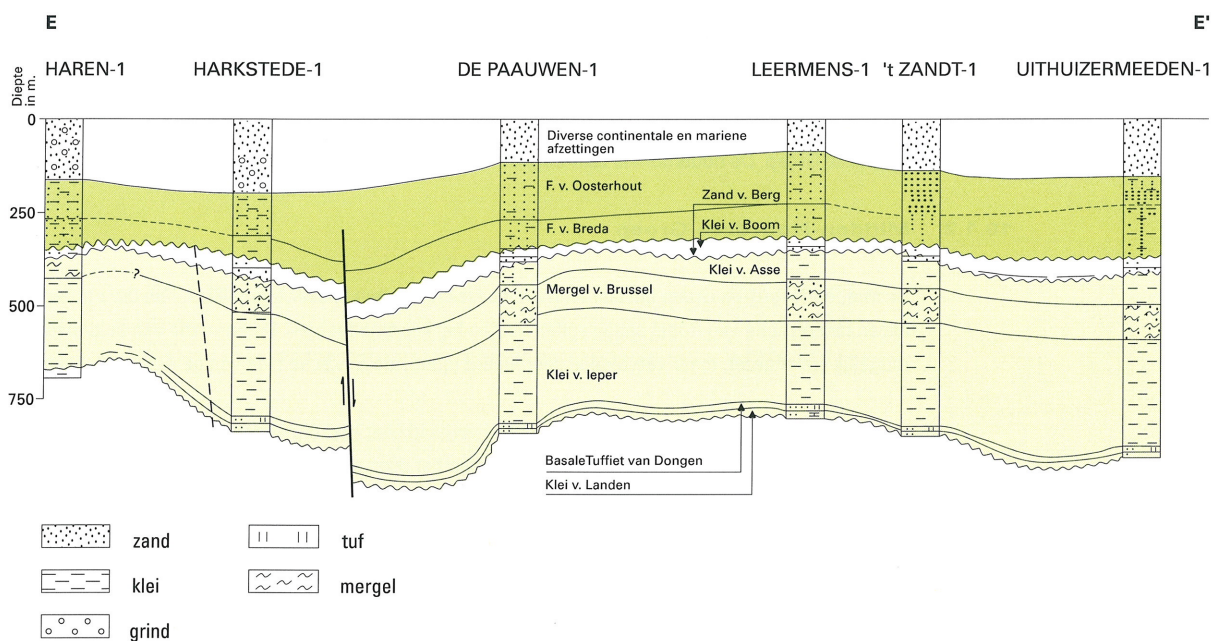
10.1.1 Onder-Noordzee Groep

De Onder-Noordzee Groep bestaat voornamelijk uit kleien met een enkele zand-inschakeling. De groep is onderverdeeld in de Formatie van Landen en de Formatie van Dongen.

De Onder-Noordzee Groep komt, behalve boven enkele zoutstructuren, in het gehele kaartbladgebied voor. De groep ligt discordant op de Krijtkalk Groep en wordt, als gevolg van de Pyreneïsche opheffingsfase van de Alpiene orogenese en daaraan gerelateerde erosie, discordant bedekt door de Midden-Noordzee Groep.

Het dikteverloop van de groep is gelijk aan dat van de Noordzee Supergroep. De maximaal doorboorde dikte bedraagt 573 m in de boring Usquert-1.

De *Formatie van Landen* bestaat in het kaartbladgebied uit de Klei van Landen. Het is een zwarte tot donkergroengrijze klei of kleisteen en heeft een gemiddelde dikte van ± 13 m. In de klei komen glauconiet, glimmers en pyriet voor. De formatie ligt discordant op de Krijtkalk Groep. De ouderdom is Paleoceen.



Figuur 10.2 Schematisch profiel E-E' door de Noordzee Supergroep aan de hand van de boringen Haren-1, Harkstede-1, De Paauwen-1, Leermens-1, 't Zandt-1 en Uithuizermeeden-1 (naar Rijks Geologische Dienst, 1984). Voor de ligging van het profiel zie figuur 1.3.

De *Formatie van Dongen* bestaat uit de Basale Tuffiet van Dongen, de Klei van Ieper, de Mergel van Brussel en de Klei van Asse. Het dikteverloop van de formatie is beïnvloed door halokinese en door erosie die plaatsvond aan het einde van het Eoceen (fig. 10.1 en 10.2). Deze is het sterkst geweest boven de zoutstructuren. In de Lauwerszee Trog en in de Waddenzee is de formatie het dikst, ruim 570 m (Usquert-1). De Formatie van Dongen heeft een Eoceen ouderdom.

De *Basale Tuffiet van Dongen* is opgebouwd uit glauconiethoudende, donkergrijze kleien met tuf-inschakelingen. De dikte van deze eenheid varieert in het gebied van 10 tot meer dan 20 m. De ouderdom is Vroeg-Eoceen.

De *Klei van Ieper* bestaat uit grijze, donkergrijze, groen tot bruine, en aan de top paarse tot roodbruine, soms siltige klei. In de bovenste helft komen plaatselijk zand- en siltlensjes met pyriet en glauconiet voor. De klei kan pyriet, schelpresten en koolbrokjes bevatten en is plaatselijk kalkhoudend. De gemiddelde dikte is ± 300 m. Boven de zoutstructuren is de Klei van Ieper dunner ontwikkeld, maar de diktevariaties zijn zeer klein. De ouderdom is Vroeg-Eoceen.

De *Mergel van Brussel* is opgebouwd uit glauconiet- en kalkhoudende, groengrijze tot lichtgrijze silt- en zandsteen. Aan de basis is de silt- en zandsteen kleiig en zachter met inschakelingen van groene kleibandjes. Het glauconiet- en kalkgehalte neemt toe naar de top waarna het in de bovenste 20 m weer afneemt. De dikte van deze eenheid varieert sterk (tussen 0 en 130 m) als gevolg van halokinese en erosie boven zoutstructuren. Overigens is de dikte rond de 100 m (fig. 10.3). De ouderdom is Midden- en Laat-Eoceen.

De *Klei van Asse* is een plastische, groengrijze tot blauwgrijze klei, die glauconiet en pyriet bevat. Het dikteverloop van deze eenheid is voornamelijk erosief bepaald. Boven de grote zoutstructuren is het laagpakket geheel afwezig. De gemiddelde dikte van de Klei van Asse is ± 60 m, maar kan in de randsynclines rond zoutstructuren oplopen tot ruim het dubbele (160 m, Usquert-1). Vermoedelijk is de afzettingdikte groter geweest gezien het erosieve contact met het Zand van Berg van de Midden-Noordzee Groep. De ouderdom is Laat-Eoceen.

10.1.2 Midden-Noordzee Groep

De Midden-Noordzee Groep bestaat uit mariene kleien met een basaal zandpakket. Van deze groep is alleen de Formatie van Rupel aangetroffen binnen het kaartbladgebied. De Formatie van Veldhoven is mogelijk wel afgezet, maar vervolgens geërodeerd tijdens de Savische fase van de Alpiene orogenese.

De diktetrend van de Midden-Noordzee Groep is vergelijkbaar met die van de Onder-Noordzee Groep. In de Waddenzee en de Lauwerszee Trog is de groep het dikst en boven de zoutstructuren, met uitzondering van Winsum en Klein-Ulsda, heeft de groep een gereduceerde dikte of is geheel afwezig door erosie. De groep ligt discordant op de Onder-Noordzee Groep en wordt, eveneens discordant, bedekt door de Boven-Noordzee Groep.

De *Formatie van Rupel* wordt gevormd door de Klei van Boom met aan de basis het Zand van Berg. De dikte van de formatie varieert sterk, van 0 m boven zoutstructuren tot lokaal meer dan 100 m in zoutdepletiegebieden. Deze waarden zijn deels uit boringen, deels uit seismische data afkomstig. De ouderdom van de formatie is Midden-Oligoceen.

Het *Zand van Berg* is een fijnzandige eenheid, met een groengrijze tot donkergrijze kleur. Deze eenheid bevat plaatselijk pyriet en glauconiet en de korrelgrootte wordt naar boven toe kleiner. Het Zand van

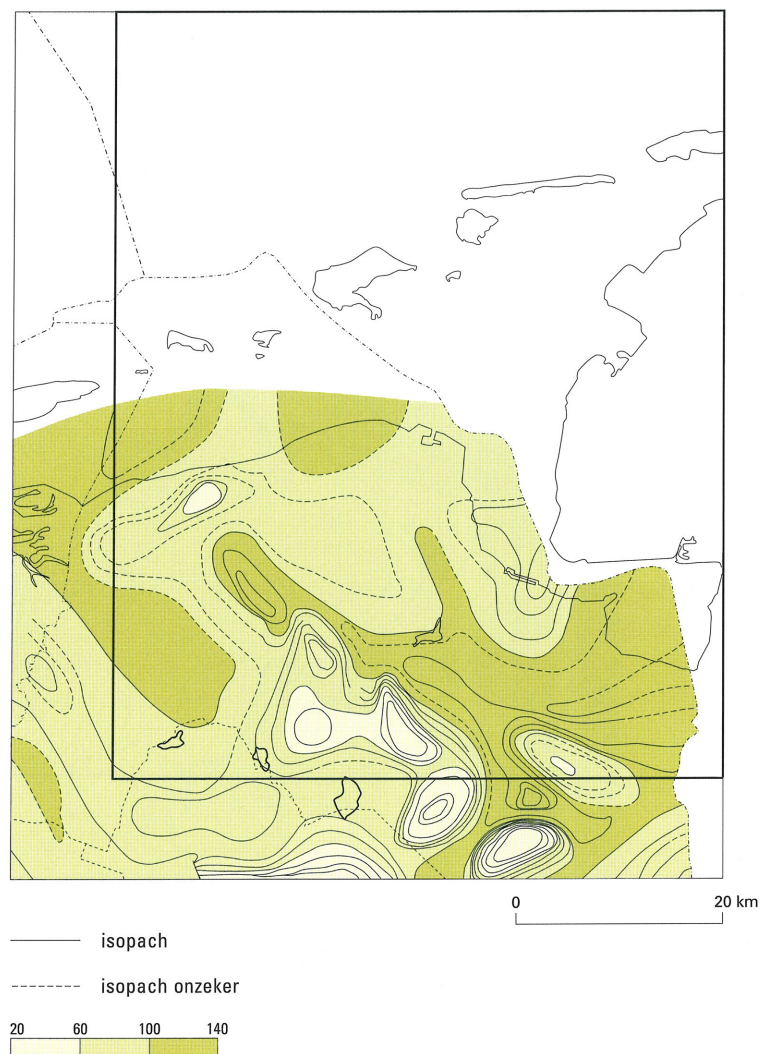
Berg is niet overal even goed ontwikkeld. Door zijn geringe dikte is het soms moeilijk te onderscheiden. De dikte in boringen varieert tussen de 0 en 12 m.

De *Klei van Boom* bestaat uit een stugge, vette, bruine tot donkergroengrijze klei met pyriet, glimmers en glauconiet. Tevens komen op enkele niveaus septariëknollen (kalkconcreties) voor. Door erosie tijdens het Onder-Mioceen varieert de dikte tussen de 0 en 160 m. Het laagpakket wordt discordant bedekt door de Formatie van Breda van de Boven-Noordzee Groep.

10.1.3 Boven-Noordzee Groep

De Boven-Noordzee Groep omvat de jongste aanwezige gesteenten, die voornamelijk uit (kleiig) zand bestaan. In deze toelichting beperkt de beschrijving zich tot de Tertiaire afzettingen. Voor de Kwartaire sedimenten wordt verwezen naar Zagwijn & Van Staalduinen (1975) en naar de in de toekomst door de Rijks Geologische Dienst te publiceren kaartbladen van de ondiepe ondergrond (1:50.000). De Tertiaire Formaties van Breda, Oosterhout en van Scheemda zijn onderverdeeld op grond van klei- en glauco

Figuur 10.3 Diktekaart van de Mergel van Brussel (Midden- tot Laat-Eoceen) (Rijks Geologische Dienst, 1984). Uit deze kaart blijkt dat de dikte verschillen sterk gerelateerd zijn aan de zoutbewegingen.

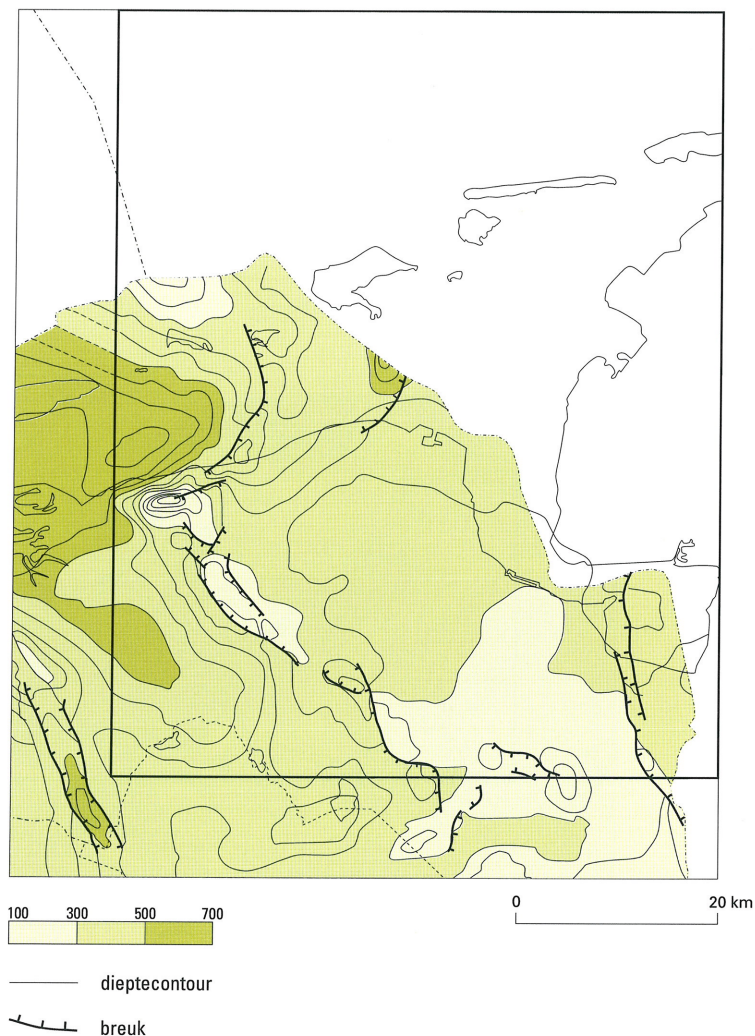


nietgehalte en afzettingmilieu. De mariene Formatie van Breda ligt aan de basis en is in het grootste deel van het kaartbladgebied aanwezig. De hierop volgende afzettingen zijn laterale equivalenten van elkaar. Dit betreft in het westen de mariene Formatie van Oosterhout en, in het (zuid)oostelijk deel de continentale Formatie van Scheemda.

De dikte van de Boven-Noordzee Groep is, behalve door de halokinese, ook door de oude Mesozoïsche structurele elementen beïnvloed (fig. 10.4). De dikte in de Lauwerszee Trog is circa 500 m terwijl de dikte op het Groningen Hoog, buiten de door halokinese beïnvloede gebieden, circa 315 m is. De maximale dikte ligt ten noorden van de zoutpijler van Pieterburen en is ruim 650 m; de minimale dikte, bóven deze zoutstructuur, is 72 m. De Boven-Noordzee Groep ligt discordant op de Midden-Noordzee Groep en heeft het maaiveld als bovengrens. De ouderdom van de Boven-Noordzee Groep is Mioceen tot recent.

De *Formatie van Breda* bestaat onderin uit een zeer glauconietrijke, groengrijze kleiige zandsteen en een siltige kleisteen van circa 7 m dikte. Het bovenste deel wordt vertegenwoordigd door een fijn tot

Figuur 10.4 Dieptekaart van de onderkant van de Boven-Noordzee Groep gebaseerd op seismische interpretatie en putinformatie. De dieptekaart is tevens diktekaart van de Miocene en Kwartaire afzettingen van de Boven-Noordzee Groep. Contourinterval 50m.



grofkorrelig zandpakket met klei-inschakelingen, glimmers, schelpresten en glauconiet. Het basale pakket is goed te herkennen op de gamma-ray log. De grote hoeveelheid glauconiet en het kleiige karakter veroorzaken een (relatief) hogere gamma straling dan het bovenste deel.

De Formatie van Breda wordt discordant bedekt door de Formatie van Oosterhout of de Formatie van Scheemda. De bovengrens van de Formatie van Breda is op de logs vaak moeilijk te herkennen. Hierdoor is de dikte van de formatie niet met zekerheid vast te stellen. Aangenomen wordt dat de dikte in het westen circa 175 m bedraagt, en in het oosten circa 75 m. Boven zoutstructuren is de formatie gedeeltelijk of geheel geërodeerd. De ouderdom van de Formatie van Breda is vroeg Midden-Mioceen tot Laat-Mioceen.

De *Formatie van Oosterhout* bestaat uit lichtbruine tot grijze, kleiige tot grofkorrelige zanden met soms een enkele klei-inschakeling. Het glauconietgehalte is lager dan in de Formatie van Breda. De afzetting is over het algemeen rijk aan schelpresten, zeeëgelfragmenten, visresten en verkoold hout.

De *Formatie van Oosterhout* komt met uitzondering van het (zuid)oosten van het kaartbladgebied en de gebieden boven grote zoutstructuren, in het gehele kaartbladgebied voor. In het westelijk deel van de Lauwerszee Trog is de formatie ± 50 m dik. De ouderdom van de Oosterhout Formatie is Pliocene. De formatie gaat naar het zuidoosten over in de Formatie van Scheemda.

De *Formatie van Scheemda* bestaat uit witte, fijne tot grove, soms kleiige zanden met grindlagen. Plaatselijk zijn zij glauconiet- en glimmerhoudend. De formatie is te onderscheiden op grond van zijn zware mineralen- en grindinhoud. Het materiaal is vanuit het oosten door rivieren aangevoerd. De formatie gaat naar het westen lateraal over in de Formatie van Oosterhout. De Formatie van Scheemda komt voor in het (zuid)oosten van het kaartbladgebied en mogelijk op het Groningen Hoog. Zij bereikt in het zuidoosten een dikte van circa 70 m. De Formatie van Scheemda heeft een Pliocene ouderdom en wordt bedekt door Kwartaire formaties.

De overige Kwartaire formaties van de Boven-Noordzee Groep zijn opgebouwd uit klei, zand en grind, afgezet onder continentale en ondiep-mariene omstandigheden (Zagwijn & Van Staalduinen, 1975). De dikte varieert van 37 m boven de zoutpijler van Pieterburen tot bijna 200 m boven inzakkingsstructuren.

10.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Tijdens afzetting van de Noordzee Supergroep maakte het kaartbladgebied deel uit van het Noordzee Bekken. De afzetting van de supergroep werd in sterke mate beïnvloed door eustatische zeespiegelbewegingen (Haq et al., 1987). Tijdens periodes van hoge zeespiegelstand vond voornamelijk sedimentatie van kleien plaats, terwijl tijdens periodes van lage zeespiegelstand zanden of zandige kleien werden afgezet. Bij extreme laagstand vond er geen afzetting plaats of trad zelfs erosie op. Opheffing gerelateerd aan een aantal tektonische bewegingen, samenvallend met perioden van lage zeespiegelstand, heeft tijdens het Tertiair geresulteerd in hiaten in de stratigrafische opeenvolging (fig. 10.1). Verder dragen verschillen in bekkendaling bij tot dikteverschillen van de afzettingen.

De sedimenten van de Onder-Noordzee Groep zijn afgezet tijdens een periode van relatief hoge zeespiegelstand, die slechts werd onderbroken door een kortstondige verlaging tijdens de afzetting van de Mergel van Brussel. Gedifferentieerde opheffing van het gebied, in combinatie met een daling van de zeespiegel, beëindigde de sedimentatie tijdens het Laat-Eoceen en leidde tot erosie.

De Midden-Noordzee Groep toont een snelle zeespiegelstijging, met hoogstand tijdens de afzetting van de Formatie van Rupel (Klei van Boom). De Formatie van Veldhoven werd afgezet tijdens een regressieve fase, waarna in combinatie met hernieuwde opheffing van het gebied de afzetting van de Midden-Noordzee Groep werd beëindigd.

Tijdens de afzetting van Boven-Noordzee Groep daalde de zeespiegel geleidelijk; dit wordt weerspiegeld in de verlanding van het gebied tijdens het Kwartair. Deze daling had een duidelijk fluctuerend karakter, zoals bij de sedimenten van de Formaties van Breda, Oosterhout en Scheemda tot uitdrukking komt in de afwisseling van zanden en kleien.

11 Geologische Geschiedenis

11.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de geologische geschiedenis van het kaartblad beschreven. Verder komen de zoutbewegingen, de maturatie van organisch materiaal en de koolwaterstof generatie aan de orde. De geologische geschiedenis betreft de periode vanaf het Laat-Carboon tot het Kwartair. Gegevens omtrent de periode hier vóór zijn te schaars voor een betrouwbare reconstructie. Het Kwartair zal in de toekomstige publicaties van de 'Geologische kaart van Nederland 1:50.000' door de Rijks Geologische Dienst worden behandeld.

De geologische geschiedenis wordt per periode beschreven, aan de hand van de verschillende tektonische fasen die in het kaartbladgebied actief zijn geweest (fig. 1.7). Tijdens het Laat-Carboon en vroegste Perm zijn dit achtereenvolgens de Sudetische, Asturische en Saalische fase. Deze fasen zijn gerelateerd aan het ontstaan van het Varistisch Gebergte in centraal Europa. Aan het einde van de Trias en gedurende de Jura vonden de Kimmerische tektonische fasen plaats. Deze laten voornamelijk rek-tektoniek zien en zijn verantwoordelijk voor de belangrijkste structurele eenheden. De Subhercynische en Laramische fasen tijdens het Laat-Krijt en de Pyreneïsche en Savische fasen tijdens het Tertiair waren gerelateerd aan de Alpiene orogenese (gebergtevorming). Compressieve deformatie reflecteert de botsing van Afrika met Europa. De tektonische fasen hebben een grote invloed gehad op de sedimentaanvoer. Samen met het klimaat en de zeespiegelstand bepalen ze de ontwikkeling van het gebied. Getracht is om de specifieke ontwikkeling van het kaartbladgebied te plaatsen in een regionaal kader. Alle belangrijke structuren die in dit hoofdstuk besproken worden staan weergegeven in figuur 1.8.

11.2 Bekkenontwikkeling, sedimentatie en tektoniek

11.2.1 Laat-Carboon.

De geologische ontwikkeling in het Laat-Carboon werd voor een groot deel bepaald door de Varistische orogenese. Tijdens deze periode botste Gondwana (Afrika en Zuid-Amerika) met Laurasië (Europa, Noord-Amerika en Azië). Hoewel het eigenlijke Varistische Gebergte ver ten zuiden van het hier behandelde kaartbladgebied ligt heeft de vorming ervan wel degelijk invloed op de geologische geschiedenis van het kaartbladgebied gehad.

De Sudetische fase, aan het begin van het Laat-Carboon, reflecteert de botsing tussen Gondwana en Laurasië. Het N-Z gerichte compressieve krachtenveld leidde tot de vorming van een O-W verlopende gebergtegordel die zich dwars door Europa uitstreckte. Als reactie op de tektonische belasting van de aardkorst, veroorzaakt door de opeenstapeling van (Varistische) overschuivingen, vormde zich ten noorden van het Varistisch Gebergte een voorlandbekken (fig. 2.4). Hierin werden enorme hoeveelheden afbraakprodukten, afkomstig uit het Varistische Gebergte, afgezet. Deze grote sedimentlast, die in het kaartbladgebied enkele duizenden meters dik is, heeft bijgedragen tot een versterking cq. versnelling van de aan de tektoniek gerelateerde isostatische daling. Sedimentatie vond plaats in een fluviatiel en lacustrien milieu. Het tropisch klimaat en de weelderige plantengroei resulteerden in uitgebreide veenmoerassen. Hoge druk en temperatuur als gevolg van de diepe begraving veranderden de veenlagen op den duur in koolbanken (zie par. 11.4).

Ten tijde van de Asturische deformatiefase, aan het einde van het Westfalien, verplaatste het front van de Varistische orogenese zich in noordwaartse richting (Lorentz & Nicholls, 1976). Hierdoor werden de afzettingen in het voorlandbekken sterk geplooid en, langs zwak hellende overschuivingsvlakken, noordwaarts getransporteerd. Nog verder naar het noorden, in de omgeving van het kaartbladgebied,

ontstonden open plooien in de Carboon sedimenten (Read & Watson, 1975; Ziegler, 1988). Deze plooien hadden in oostelijk Nederland en westelijk Duitsland waarschijnlijk een WNW-OZO richting.

De plooiing ging gepaard met opheffing en erosie waardoor, tijdens de Asturische fase, een deel van de bovenste Westfalien sedimenten is geërodeerd. Hoeveel er is geërodeerd kan in het kaartblad-gebied niet precies bepaald worden doordat de Asturische discordantie door de jongere, Saalische, wordt aangesneden. Maar gezien het feit dat Stefanien sedimenten ten oosten van het kaartbladgebied (in Duitsland) direct op het Westfalien C liggen, kan worden aangenomen dat ook binnen het kaartbladgebied de Westfalien D en een deel van de Westfalien C sedimenten zijn geërodeerd.

Gedurende de Saalische fase, aan het einde van het Carboon en begin van het Perm, ontstond er een transpressioneel spanningsveld door de dextrale beweging van Europa ten opzichte van Afrika (Arthaud & Matte, 1977; Ziegler, 1989). Hierdoor veranderde het N-Z gerichte compressieve krachtenveld in een regime met O-W georiënteerde rekspanningen. Ten noorden van het Varistische orogene front ontstond zodoende een ongeveer NW-ZO en een O-W georiënteerd breuksysteem, dat wordt gekenmerkt door dextrale zijschuivingen. Bewegingen langs dit breuksysteem hebben in het Varistische voorland geleid tot het ontstaan van verscheidene horsten en slenken (Ziegler, 1982, 1988). Met name het Eems Diep is hiervan een voorbeeld.

De breukbewegingen gingen, vooral in Noord-Duitsland, Polen en het Noordzeegebied, gepaard met vulkanisme (Lorentz & Nicholls, 1976). In het kaartbladgebied zelf zijn geen aanwijzingen gevonden voor vulkanisme uit deze periode maar direct ten zuiden ervan zijn vulkanische afzettingen van de Onder-Rotliegend Groep aangeboord. Ook uit het Duitse deel van het Eems Diep zijn dikke pakketten vulkanische gesteenten bekend. Ook de vitrinietreflecties van het Carboon suggereren een hogere warmtestroom langs de oostrand van het Groningen Hoog. Deze opwarming is mogelijk afkomstig van plateau-basalten die net ten oosten van het kaartbladgebied zijn aangetroffen (Ziegler, 1990). Duidelijke aanwijzingen voor zijschuivingen in het kaartbladgebied zijn er niet. Mogelijk is de, ten westen van de Lauwerszee Trog gelegen, Hantum Breuk wél een zijschuiving en de Lauwerszee Trog een slenk als gevolg van deze zijschuiving. Het anticlinorium, dat tijdens de Asturische fase was ontstaan, werd (opnieuw) opgeheven en vervormd tot de dome-vormige structuur die nu in het Carboon te herkennen is (fig. 2.1). Erosie heeft in het centrale deel hiervan tot het Westfalien A ingesneden. Deze erosie is het gevolg van zowel tektonische opheffing als van een eustatische zeespiegelverlaging die werd veroorzaakt door een maximale uitbreiding van de Gondwana-ijskap (Ziegler, 1990). De erosie als gevolg van de Asturische én de Saalische tektonische fase, en mogelijk een periode van non-depositie op het regionale hoog aan het einde van het Laat-Carboon, veroorzaakten een hiaat dat maximaal een periode van het Westfalien A tot en met het Vroeg-Perm omspannt (fig. 1.6).

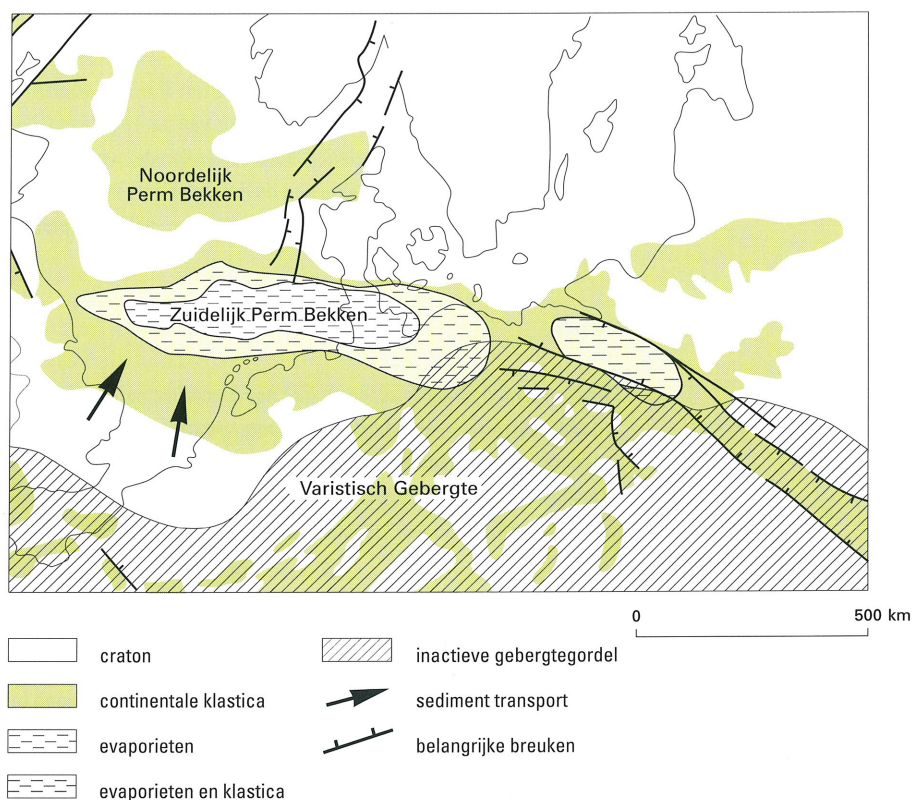
De structuren die aan het einde van het Carboon in het kaartbladgebied en de omgeving daarvan waren gevormd, blijken bepalend te zijn geweest voor de verdere ontwikkeling van dit gebied. Uit de afgedekte kaart onder het Boven-Rotliegend (fig. 2.1) komen enkele structurele elementen naar voren die als voorlopers gezien kunnen worden van latere hogen en bekkens. Zo wijst de diep insnijdende erosie in het centrum van de dome op een structureel hoog dat gezien kan worden als de voorloper van een deel van de Netherlands Swell (Trias) en van het Groningen Hoog (Laat-Jura). Ook de westelijke begrenzing van het Eems Diep was in essentie aanwezig. De ontwikkeling van de Lauwerszee Trog echter, was nog zeer prematuur.

11.2.2 Perm

Aan het einde van de Saalische tektonische fase in het Vroeg-Perm, was een uitgestrekte landmassa ontstaan. Daling van de, door de Varistische orogenese veroorzaakte, anomaal hoge temperaturen in de lithosfeer leidde tot dalingen van de aardkorst. Zodoende ontstond een uitgestrekt intra-cratonisch continentaal bekken: het Zuidelijk Perm Bekken (Ziegler, 1982; fig. 11.1). In dit dalende bekken werden klastische sedimenten afgezet afkomstig van het Varistische Gebergte en het daarbij behorende voorland. Er ontstonden een aantal N-Z verlopende depressies als gevolg van de O-W gerichte, Saalische rekspanningen. In deze depressies, o.a. het Eems Diep en het Off-Holland Low, concentreerde zich de afwatering vanuit het zuidelijk gelegen Varistische achterland. Uit figuur 3.4 (Van Wijhe et al., 1980), blijkt de invloed van het Eems Diep in het kaartbladgebied. De sedimentatie werd hier gedomineerd door fluviatile facies, afgezet in een woestijngebied, terwijl ten westen van het kaartbladgebied, buiten de invloedssfeer van het Eems Diep, de sedimentatie werd gedomineerd door eolische afzettingen.

Binnen het kaartbladgebied werd de sedimentatie pas tijdens het Laat-Perm hervat. De sedimentaire ontwikkeling tijdens het Vroeg-Perm werd, behalve door de thermische daling en de tektoniek, ook beïnvloed door fluctuaties in de waterhoogte van het zoutmeer. Dit (playa)meer bevond zich ten noorden van het kaartbladgebied, in het centrum van het Zuidelijk Perm Bekken (fig. 11.1). Een verhoging van het waterpeil veroorzaakte zuidwaartse uitbreidingen van de lacustriene sedimenten. In het kaartbladgebied leidde dit tot de afzetting van de Ameland en de Ten Boer Kleisteen (fig. 3.1).

Figuur 11.1 Paleogeografische kaart van Noordwest-Europa tijdens het Vroeg-Perm met de lokatie van het Zuidelijk Perm Bekken (naar Ziegler, 1982).



Tijdens het Laat-Perm trad een abrupte omslag op in het sedimentatiepatroon. Slenk-vorming in het Noord-Atlantische/Arctische gebied, tezamen met een eustatische zeespiegelstijging als gevolg van het smelten van de ijskap van Gondwana leidde tot de vorming van een open verbinding tussen de in het noorden gelegen Barentsz Zee en het continentale Noordelijk en Zuidelijk Perm Bekken (fig. 11.1). De bekken waren reeds onder het toenmalige zeeniveau gedaald, waardoor een zeer snelle transgressie plaatsvond (Glennie, 1986). Een grote Zechstein binnenzee, in zowel het Noordelijk als Zuidelijk Perm Bekken, was het gevolg.

Het sedimentatiepatroon in de Zechstein zee werd in sterke mate beïnvloed door de influx van vers zeewater. Deze toevoer, die door de beperkte toegang vanuit de Barentsz Zee moest komen werd regelmatig onderbroken. Waarschijnlijk bevond zich tussen de Zechstein binnenzee en de Barentsz Zee een drempel die door een kleine verlaging van de zeespiegel de Zechstein binnenzee al afsloot van de oceaan.

Stagnatie van de toevoer en sterke verdamping onder invloed van het warme en droge klimaat deden de saliniteit van het zeewater sterk toenemen. Bij voldoende concentratie konden zich vervolgens carbonaten en evaporiet series vormen. Elke grootschalige toestroom van zeewater als gevolg van glacio-eustatische zeespiegelverhogingen betekende de start van een nieuwe evaporietcyclus. In het kaartbladgebied zijn vier van deze cycli te onderscheiden. Tektonisch gezien was het Zechstein een rustige periode, de regionale daling van het gebied werd bijgehouden door de sedimentatie. De hogere cycli laten een geleidelijke verlanding van het Zuidelijk Perm Bekken zien waarin met name de 4^e en 5^e cyclus het resterende reliëf invulden waardoor uiteindelijk een uitgestrekt vlak gebied ontstond. Een zeespiegeldaling aan het einde van de Zechstein resulteerde in de definitieve overgang naar een continentaal milieu (Haq et al., 1987).

De dikke zoutpakketten die, met name in de 2^e en 3^e cyclus voorkomen, hebben een belangrijke invloed gehad op de deformatiegeschiedenis van het kaartbladgebied. Door de plastische eigenschap van zout deformeert het aanzienlijk makkelijker dan de overige gesteenten. Enerzijds heeft dit geresulteerd in een ontkoppeling van de deformatie boven en onder de Zechstein zouten. Anderzijds heeft dit geleid tot de vorming van zoutkussens en -pijlers. In paragraaf 11.3 wordt hier nader op ingegaan.

11.2.3 Trias

De overgang naar de Trias wordt met name gereflecteerd in de omslag van het sedimentaire milieu. Structureel gezien veranderde er in eerste instantie nog weinig. Het Zuidelijk Perm Bekken bleef in essentie voortbestaan en wordt om die reden ook dikwijls het Permo-Triassisch Bekken genoemd. Klastische sedimenten werden vanuit het zuiden aangevoerd over een uitgestrekt, vlak overstromingsgebied en afgezet in een lacustrien milieu.

Na de aanvankelijk uniforme daling tijdens het begin van de Vroeg-Trias, werden de structurele eenheden uit het Perm, zoals het Off-Holland Low en het Eems Diep gereactiveerd. In Noord-Nederland ontstond door opwelling tussen beide dalingsgebieden de NNO-ZZW georiënteerde Netherlands Swell (fig. 5.2). De noordoostelijke punt van dit hoog bedekt het grootste deel van het kaartbladgebied. Synsedimentaire bewegingen resulteerden in laterale faciesverschillen in de jongere Onder-Bontzandsteen afzettingen (het Rogenstein Laagpakket). De fluviatiele afzettingen van de daarop volgende Hoofd-Bontzandsteen zijn voornamelijk bewaard gebleven in de dalingsgebieden.

Op de Netherlands Swell is slechts een relatief dunne, cyclische afwisseling van zand- en kleisteen bewaard onder de Basis-Solling discordantie. De cycliciteit werd veroorzaakt door variaties in waterhoogte in het Permo-Triassisch Bekken en mogelijk door opheffingen van het achterland. Een verdere opheffing van de Netherlands Swell tijdens het Laat-Scythien beëindigd de afzetting van de Hoofd-Bontzandsteen. Erosie verwijderde vervolgens dikke pakketten Trias gesteente en veroorzaakte aldus de Basis-Solling discordantie, die in het kaartbladgebied plaatselijk op de Onder-Bontzandsteen ligt (fig. 5.2).

Gekoppeld aan de breukbewegingen die zich voordeden bij de differentiële daling van het Eems Diep hebben zich aan de oostzijde van de Netherlands Swell de eerste zoutbewegingen binnen het kaartbladgebied voorgedaan (zie par. 11.3).

Gedurende de Midden-Trias leidden voortgaande daling en een netto zeespiegelstijging (Vail et al., 1977) tot een transgressie. Tijdens de afzetting van de Muschelkalk bereikte de zeespiegelstijging zijn maximum. De zee overspoelde de klastische brongebieden waarna, door de afname van klastische influx, carbonaatgesteenten konden worden afgezet. Een regressie tijdens de Laat-Trias (Keuper) deed de continentale omstandigheden terug keren. Door latere erosie zijn in het grootste deel van het kaartbladgebied de Midden- en Laat-Trias afzettingen verdwenen. Alleen in de Lauwerszee Trog en in het Eems Diep is, door de sterke locale daling, een dunne sequentie bewaard gebleven. Laterale faciesveranderingen vanuit het Eems Diep in de richting van de Netherlands Swell (Schröder, 1982) doen vermoeden dat gedurende de Midden- en Laat-Trias het kaartbladgebied, als onderdeel van de Netherlands Swell, een relatief langzaam dalend gebied is geweest waar in een randgebied een gecondenseerde opeenvolging werd afgezet.

Tijdens de Laat-Trias vond er in het kaartbladgebied, een kleine opheffing plaats die gerelateerd is aan de zogenaamde Vroeg-Kimmerische tektonische fase (Haanstra, 1963; 't Hart, 1969). Deze zogenaamde opheffing ging gepaard met een zeespiegelverlaging en resulteerde in de erosie van de bovenste Trias.

11.2.4 Jura

De Jura en het vroegste Krijt vormden een tektonisch zeer actieve periode. In deze periode begon de opening van de Atlantische Oceaan en zette de desintegratie van Pangea door, een voortschrijdend proces waarin een aantal grootschalige extensionele fasen is te onderscheiden. Deze zogenaamde 'Kimmerische' fasen beheersten de structurele ontwikkeling van Noordwest-Europa. Zij worden om praktische redenen gerelateerd aan de belangrijkste onderbrekingen in de stratigrafische opeenvolging. In werkelijkheid is de scheiding tussen de verschillende fasen niet zo expliciet (Stille, 1924; Ziegler, 1978, 1982).

Na de kortdurende erosie als gevolg van de Vroeg-Kimmerische tektonische fase, tijdens de Laat-Trias, daalde het gebied aan het begin van de Jura weer snel. Dit in combinatie met een zeespiegelstijging, resulteerde in de afzetting van mariene sedimenten. Hoewel de Onder-Jura sedimenten momenteel in gescheiden bekkens voorkomen (fig. 1.8) zijn ze ooit in één uitgestrekt aaneengesloten gebied afgezet, ongeveer in het areaal van het Zuidelijk Perm Bekken. Dit is af te leiden uit de uniforme opbouw van fijnkorrelige marine sedimenten waarin geen indicatie van kustnabijheid is te vinden.

Tijdens de Mid-Kimmerische tektonische fase gedurende de Midden-Jura (Bajocien-Bathonien) vond in het Noordzee gebied opheffing plaats van een uitgebreid gebied. De op deze wijze ontstane Centrale Noordzee Dome omvatte belangrijke hogen als het Mid-Noordzee Hoog en strekte zich uit tot aan de noordrand van Nederland (Ziegler, 1990; fig. 6.2). Het effect van de opheffing werd versterkt door een

gelijktijdige zeespiegeldaling (Vail et al., 1977). Het grootste deel van het kaartbladgebied lag tijdens de Midden-Jura vermoedelijk boven de zeespiegel (Ziegler, 1990). Dit verklaart het regressieve karakter en de zeer beperkte verspreiding van Midden-Jura sedimenten in het kaartbladgebied ten zuidoosten van het Groningen Hoog (fig. 6.2).

De Laat-Jura is een periode waarin zich belangrijke tektonische gebeurtenissen voltrokken. Dit betreft de zogenaamde Laat-Kimmerische fase met een eerste puls aan het begin van de Laat-Jura, en een tweede puls aan het begin van het Krijt. Tijdens de eerste puls nam de betekenis van de Centrale Noordzee Dome af. O-W gerichte rekspanningen leidden tot de zuidwaartse uitbreiding van de Centrale Noordzee Slenk. De rekbewegingen in de korst onder de slenk werden aan het zuidelijke uiteinde geaccommodeerd door transtensionele dextrale zijschuivingen langs een systeem van gereactiveerde NW-ZO strekkende breuken (fig. 6.2). Dit geschiedde enerzijds onder invloed van het rigide Londen-Brabant Massief dat zuidwaartse progradatie bemoeilijkte. Anderzijds kwam dit door de aanwezigheid van een relatieve zwaktezone, een van oorsprong Varistisch (eventueel zelfs Caledonisch) breukenstelsel, ten noorden van dit massief. Zodoende vormden zich, parallel aan het Londen-Brabant Massief, een aantal NW-ZO georiënteerde bekkens en hogen (fig. 7.2, Ziegler, 1982). Met name de Hantum Breuk en de vorming van het Noord-Nederlands Hoog, dat o.a. het Groningen Hoog omvatte, hebben directe consequenties voor de geologische ontwikkeling van het kaartbladgebied gehad (fig. 1.8 & 7.2). Aanvankelijk is gedurende de Laat-Kimmerische fase het Noord-Nederlands Hoog opgeheven, gekanteld, geërodeerd en in verschillende elementen opgebroken (Stäuble & Milius, 1970). Tektonisch gecontroleerde sedimentatie vond plaats in breukbegrensde sedimentaire bekkens. Aangrenzende opgeheven delen werden brongebied voor deze klastische afzettingen. Dit betreft met name het Vlieland Bekken en het Nedersaksisch Bekken (fig. 1.8 & 7.2). In het kaartbladgebied ontstond waarschijnlijk in deze periode opnieuw een differentiatie tussen de Lauwerszee Trog en het Groningen Hoog. In de Lauwerszee Trog zijn echter geen Boven-Jura sedimenten aangetroffen. Het is echter mogelijk dat ze wel zijn afgezet, maar tijdens de tweede puls van de Laat-Kimmerische fase zijn geërodeerd. Het Eems Diep verloor tijdens de Kimmerische fase zijn oorspronkelijke configuratie. Na de Laat-Kimmerische fase werd in deze regio de daling van het Nedersaksisch Bekken dominant.

In het kaartbladgebied zijn alleen in twee boringen op het Groningen Hoog en in de randsyncline van de Winschoter zoutpijler sedimenten met een Laat-Jura ouderdom aangetroffen. Daar de aangeboorde afzettingen continentaal zijn moet worden aangenomen dat het kaartbladgebied nog steeds deel uitmaakte van het Noord-Nederlands Hoog. Het hoog had zich weliswaar verkleind aan de west- en noordkant, maar zich tegelijkertijd uitgebreid in zuidoostelijke richting (fig. 6.2 & 7.2; Ziegler, 1990).

Ook als gevolg van de tweede puls van de Laat-Kimmerische fase trad sterke erosie van de hoog gelegen delen op. Aangezien de hiaten in de sedimentaire opeenvolging met elkaar overlappen, is het niet goed mogelijk de bewegingen van de afzonderlijke Kimmerische tektonische pulsen, van elkaar te onderscheiden. De mate van erosie blijkt uit de afgedekte kaart onder de Laat-Kimmerische discordantie (fig. 1.8). Voor de Kimmerische deformatiefase in zijn geheel kan echter gesteld worden dat langs de Hantum Breuk en langs het Groningen Hoog enorme bewegingen hebben plaatsgevonden. Profiel 2 (Kaart 15) illustreert dit aan de hand van het grote dikteverschil van het Trias pakket aan weerszijden van het Groningen Hoog. Aan de oostkant van de Lauwerszee Trog veroorzaakten de Kimmerische bewegingen een netto vertikaal verzet van ± 700 m (Kaart 6). Dat verzet is hier deels ontstaan door breukbewegingen en deels door de doorbuiging (flexuur) van de Lauwerszee Trog (Kaart 15). Aan de westkant van de Lauwerszee Trog is de beweging langs de Hantum Breuk verantwoordelijk voor maximaal 1100 m verticaal verzet (Rijks Geologische Dienst, 1991b). De veronderstelde dextrale zijschuivingscomponent langs deze breuk (Ziegler, 1982; Van Wijhe, 1987) is niet te kwantificeren.

11.2.5 Krijt

Aan het begin van het Krijt vond een mondiale zeespiegelstijging plaats. Deze Krijt-transgressie was waarschijnlijk de respons op de toegenomen spreidingssnelheden van de oceaanbodem en de daaraan gekoppelde volume vergroting van de mid-oceanische ruggen (Pitman, 1978; Donovan & Jones, 1979). De zeespiegel bereikte haar relatief hoogste stand in het Laat-Campanien (Hancock & Scholle, 1975). Deze zeespiegelstijging resulteerde, tezamen met de thermische daling van het Groningen Hoog, in een transgressie die het hoog langzamerhand geheel overspoelde. Het reliëf dat door de Laat-Kimmerische fase was ontstaan werd in het Valanginien, Hauterivien en Barremien, door mariene afzettingen opgevuld (Vlieland Subgroep). In beginsel was de sedimentatie beperkt tot de bekkens maar vanaf het Hauterivien werden de hooggelegen gebieden geleidelijk overspoeld. Doordat de spreiding van de oceaanbodem zich gedurende het Vroeg-Krijt meer concentreerde in het noordelijke deel van de Atlantische Oceaan en de Golf van Biscaye (Hancock, 1984; Ziegler, 1989), nam de slenk-vorming in de Noordzee steeds verder af. Een continue thermische daling van het gehele Noordzee Bekken was het gevolg. Tijdens het Vroeg-Krijt was de daling in het kaartbladgebied zeer uniform, blijktens de diktekaart van de Rijnland Groep (Kaart 10). De sedimentatie in deze periode werd in het kaartbladgebied een aantal malen onderbroken, getuige de hiaten in de Vlieland Subgroep (fig. 8.1). Aan het begin van het Aptien was het reliëf vrij laag, hetgeen valt af te leiden uit de tamelijk constante dikte van de Holland Formatie. Gedurende het Vroeg- tot Midden-Aptien vond er een kortdurende regressie plaats. Deze regressie is gerelateerd aan de Austrische tektonische puls en uit zich in het kaartbladgebied door een klein hiaat aan de basis van de Midden-Holland Schalie (fig. 8.1; RGD, 1992c). De periode vanaf Laat-Aptien tot Midden- (of Laat-) Albien werd gekenmerkt door een nieuwe transgressieve fase, de zogenaamde Albien-transgressie. Blijkens de verschillende discordanties en hiaten, bestaat zij uit meerdere pulsen die in geheel Noordwest-Europa worden herkend. Uiteindelijk ontstond er een open-marien milieu dat zich ten noorden van de huidige Alpen en Karpaten over een groot deel van Europa uitstrekte (Hancock & Scholle, 1975). Gedurende de Albien-transgressie werden de hoogste delen van het Noord-Nederlands Hoog overspoeld (Crittenden, 1987), waardoor overal in het kaartbladgebied sedimentatie plaatsvond.

Doordat de Krijt-transgressie zich steeds verder uitbreidde werd de afstand tot de brongebieden van klastische sedimenten groter en het oppervlak van die brongebieden steeds kleiner. Het aandeel van terrigeen klastisch materiaal in de sedimenten nam daardoor af. De Boven-Krijt afzettingen bestaan daarom voornamelijk uit mariene bioklasten. In de sedimentaire opeenvolging is een aantal discordanties en hiaten aanwezig, deels veroorzaakt door zoutbewegingen en deels te relateren aan tektonische bewegingen en zeespiegelfluctuaties.

Een verandering trad op aan het einde van het Krijt. Na een periode van betrekkelijke rust begonnen gedurende het Laat-Krijt sterke tektonische bewegingen. Europa onderging een belangrijke plaat-reorganisatie als gevolg van extensie en slenk-vorming voorafgaand aan de oceaanbodem-spreiding in de Arctische en Noord-Atlantische Oceaan en als gevolg van de botsing tussen Afrika en Europa. Terwijl in Midden-Europa een eerste aanzet tot vorming van het Alpiene gebergte werd gegeven, kwam het Noordwest-Europees platform, waar de Krijt sedimentatie plaatsvond, opnieuw onder invloed van een compressief tektonisch regime. Reeds bestaande breuken werden als sinistrale, transpressieve schuifbewegingen gereactiveerd (Van Wijhe, 1987). Dit resulteerde in de relatieve opheffing van een aantal vroegere bekkens en daling van hogen in Noordwest-Europa (inversie). Deze inversie voltrok zich in een serie pulsen die in twee hoofdfasen worden gegroepeerd: de Subhercynische fase gedurende Santonien en Campanien, en de Laramische fase, tijdens het Laat-Krijt (Ziegler, 1982). Deze laatste valt samen met een belangrijke zeespiegelverlaging waardoor het bovenste Krijt (Laat-Maastrichtien) in het kaartbladgebied geërodeerd werd. Ziegler (1982) koppelt

deze inversie direct aan de botsing tussen Afrika en Europa. Baldschuhn et al. (1991) schrijven compressieve spanningen in de korst van NW-Europa meer aan lokale processen toe dan aan het op grote afstand actieve orogeen. Coward (1991), tenslotte, ziet een relatie tussen de inversiefasen en de opening van de Atlantische Oceaan.

Binnen het kaartbladgebied is het niet tot een opheffing als gevolg van inversie gekomen. Wel is er een waarneembare verschuiving in dalingssnelheid van de Lauwerszee Trog naar het Groningen Hoog. De Lauwerszee Trog, die voorheen nog een halfgraben vormde tussen het Friesland Platform en het Groningen Hoog, daalde tijdens het Laat-Krijt minder snel dan het Groningen Hoog. Hierdoor is de dikte van de Laat-Krijt sedimenten (Krijtkalk Groep) op het Groningen Hoog groter dan in de Lauwerszee Trog. Ook is hierdoor het Maastrichtien in het noordoosten van het kaartbladgebied afgezet en bewaard gebleven (fig. 9.1).

Door zoutbewegingen bevinden zich juist boven zoutpijlers en zoutkussens naast verdunningen ook kleine intraformationele hiaten, afsnijdingen en hoekdiscordanties; deze zijn met name ontstaan gedurende het Santonien en het Campanien (Boring Winsum, fig. 9.1; RGD, 1992a). Een en ander wijst op een intermitterende stijging van het zout waarbij, afhankelijk van de snelheid, een gereduceerde sectie werd afgezet dan wel erosie optrad. Tegelijkertijd werden in gebieden waar het zout wegvloede, dikkere sequenties Krijtkalk afgezet. Een dergelijke sequentie is onder andere aangeboord in De Hond-1 (fig. 9.1) gelegen in het depletiegebied tussen de zoutstructuren Eems en Bierum (fig. 11.2, Kaart 4).

11.2.6 Kenozoïcum

Na de Laramische tektonische fase vormde zich, tijdens het Kenozoïcum, het Noordzee Bekken, dat tot op heden de sedimentatie beïnvloedt. Tijdens het Tertiair en het Kwartair, zorgden een stijgende zeespiegel en een voortgaande regionale daling in het centrum van het Noordzee Bekken voor de afzetting van meer dan 3500 m sediment. De sterke daling van de centrale as van het bekken, welke ruwweg samenvalt met de Viking Graben en de Centrale Noordzee Slenk, kan verklaard worden door de afkoeling en contractie van de lithosfeer en door de isostatische daling als gevolg van de sedimentbelasting in een post-rifting model (McKenzie, 1978; Sclater & Christie, 1980). In het kaartbladgebied is de daling echter veel minder en de dikte van de Kenozoïsche sedimenten is hier gemiddeld slechts 900 m. Door zoutbewegingen zijn plaatselijk inzakkingsstructuren of depletiegebieden ontstaan waar de afzettingen maximaal 1600 m dik zijn (Kaart 13).

In het Noordzee Bekken werden silici-klastische sedimenten afgezet die als gevolg van de Laramische opheffing en erosie van het omliggende land ruim voorhanden waren en die zodoende een einde maakten aan de bioklastische sedimentatie uit het Laat-Krijt. Gedurende het Tertiair is de sedimentatie in grote mate beïnvloed door zeespiegelbewegingen (Haq et al., 1987) en door een aantal, aan de Alpiene orogenese gerelateerde en met erosie gepaard gaande, tektonische fasen zoals de Pyreneïsche (Vroeg-Oligoceen) en de Savische (overgang Oligoceen-Mioceen) fase (Letsch & Sissingh, 1983). Zeespiegelbewegingen veroorzaakten een afwisseling van klei- en zandafzettingen, waarbij de kleien voornamelijk werden afgezet tijdens een hoge zeespiegelstand en de zanden tijdens een lage zeespiegelstand.

Aan het einde van het Mioceen werd door de voortschrijdende verlanding op het Groningen Hoog de, al enkele malen onderbroken, afzetting van mariene sedimenten definitief beëindigd, waarna afzetting van continentale sedimenten plaatsvond (Formatie van Scheemda). In de Lauwerszee Trog ging de mariene sedimentatie nog door.

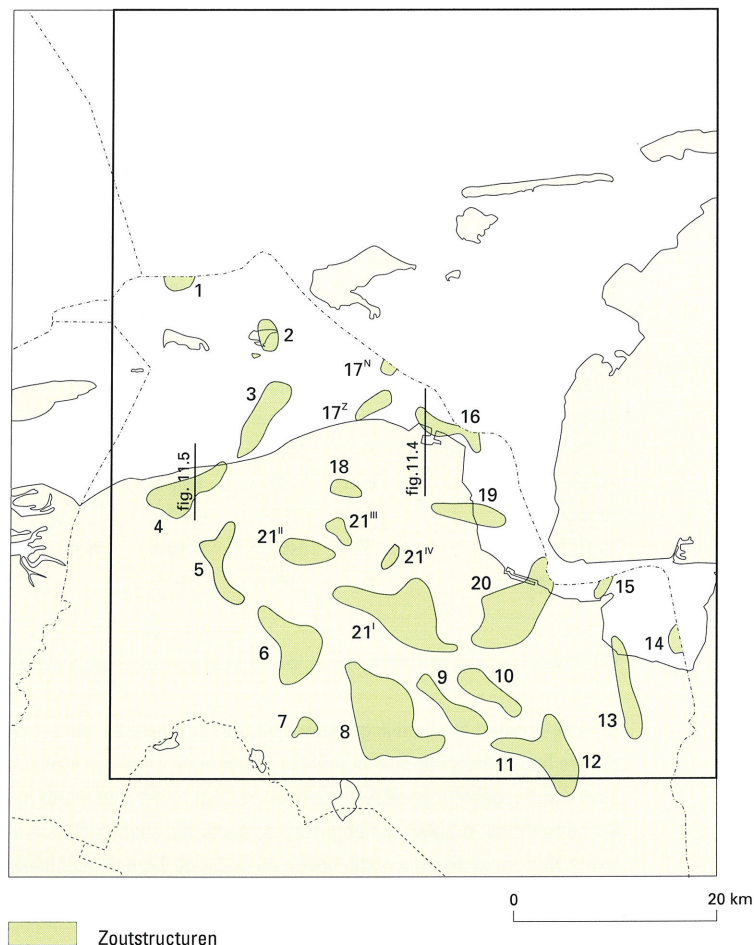
Op de dieptekaart van de basis van de Boven-Noordzee Groep, die werd afgezet tijdens het Neogeen en het Kwartair, zijn nog maar weinig invloeden van de zoutbewegingen te vinden (fig. 10.4). Wel is het Groningen Hoog te onderscheiden van de Lauwerszee Trog. Dit geeft aan dat deze structurele elementen nog steeds actief waren. De bewegingen hebben zich tijdens de tektonische fasen blijkbaar weer geconcentreerd langs de oude breuksystemen, waarbij in de Lauwerszee Trog een grotere daling plaatsvond dan op het Groningen Hoog zoals in de gehele periode vóór het Laat-Krijt.

11.3 Zoutbewegingen

11.3.1 Inleiding

Zoals uit de voorafgaande hoofdstukken blijkt, heeft het plastische gedrag van het steenzout grote invloed gehad op de geologische ontwikkeling. Enerzijds door de passieve rol die het zout speelt bij regionale deformatie, want door haar gesteente-eigenschappen absorbeert zij als het ware de deformatie die in het substraat optreedt. Zodoende wordt de deformatie van het gesteentepakket onder het Zechstein zout ontkoppelt van het pakket erboven (Kaarten 2 & 5). Anderzijds, door de actieve rol die het zout speelt tijdens de vorming van de zoutstructuren. Dit manifesteert zich in diktevariaties in het afdekkend pakket als gevolg van synsedimentaire zoutvloei, en in deformatie van

Figuur 11.2 Locatiekaart van de binnen het kaartbladgebied voorkomende zoutaccumulaties. Veel zoutkussens worden concordant bedekt door Onder-Germaanse Trias. In het kaartbladgebied kunnen zowel kussens als pijlers bedekt worden door Rijnland sedimenten. De toppen van de structuren Pieterburen en Klein-Ulsda worden zelfs bedekt door Boven-Krijt en Tertiaire sedimenten. Voor de nummering zie tabel 11.1.



dat pakket als gevolg van het omhoog drukken of doorbreken van dit pakket door het zout.

De afmetingen en de locaties van de zoutstructuren kunnen het best afgeleid worden uit de dieptekaart van de top van de Zechstein Groep (Kaart 3) en de diktekaart van deze groep (Kaart 4). Diktevariëaties van de Mesozoïsche en Kenozoïsche eenheden reflecteren de gevolgen van de verticale structurele bewegingen en van zoutbewegingen. Dit geeft een indicatie voor de bewegingsgeschiedenis van de zoutstructuren gedurende het corresponderende tijdvak. Tenslotte blijken de perioden van versnelde zoutvloeï samen te vallen met de tektonische fasen.

Binnen het kaartbladgebied worden eenentwintig zoutstructuren onderscheiden (tabel 11.1, fig. 11.2) waarvan er een aantal doorlopen op Duits grondgebied (NLFb, 1989; Jaritz, 1973, 1992).

Tabel 11.1

Tabel 11.1 Overzicht van zoutstructuren met enkele karakteristieken. De nummering van de zoutstructuren verwijst naar locaties in fig. 11.2.

Het type structuur betreft

P: zoutpijler of

K: zoutkussen.

De dikte van de caprock betreft de grootste dikte zoals is afgeleid uit boringen. Het afdekkend pakket is het gesteente dat direct op de zoutstructuur ligt.

<i>Naam</i>	<i>Type</i>	<i>Dikte (max)</i>	<i>Diepte (top)</i>	<i>Caprock (dikte)</i>	<i>Afdekkend Pakket (ouderdom)</i>
1. Riffgrund	K	2000 m	1600 m		Onder-Trias
2. Rottumeroog	K	2200 m	1400 m		Onder-Trias
3. Groninger Wad I	P	1700 m	1400 m		Onder-Krijt
4. Pieterburen	P	2700 m	150 m	90 m	O.Trias/B.Krijt/Tertiair
5. Winsum	K	1500 m	1500 m		Onder-Trias
6. Groningen	K	1600 m	1200 m		Onder-Trias
7. Haren	K	1400 m	1700 m		Onder-Trias
8. Hoogezand	K	1600 m	1000 m		O.Trias/O.Krijt
9. Noordbroek	K	1100 m	1500 m		Onder-Trias
10. Nieuw-Scheemda	K	1100 m	1600 m		O.Trias/Jura
11. De Eeker	K	1100 m	1300 m		O.Krijt/O.Jura
12. Winschoten	P	2200 m	500 m	20 m	O.Trias/O.Krijt
13. Klein-Ulsda	P	2200 m	1100 m		O.Trias/B.Krijt
14. Landschapspolder	P	2400 m	1100 m	40 m	Onder-Krijt
15. Dollart	K	1400 m	1600 m		Onder-Trias
16. Eems	K	1300 m	1600 m		Onder-Krijt
17. Groningen Wad IIN	P	1400 m	1700 m		Onder-Krijt
Groningen Wad IIZ	K	1200 m	1400 m		Onder-Krijt
18. Usquert	P	1100 m	1600 m		Onder-Krijt
19. Bierum	K	1500 m	1800 m		Onder-Krijt
20. Delfzijl	P/K	1400 m	1400 m	30 m	Onder-Krijt
21. Ten Post I-IV	K	1100 m	1600 m		Onder-Krijt

11.3.2 Gesteente-eigenschappen en ontstaansmechanisme

Zout deformeert aanzienlijk gemakkelijker dan competente gesteenten zoals zandsteen en kalksteen. Brosse breukbewegingen in dergelijke competente gesteenten zullen door het plastische gedrag van zout worden geacommodeerd, de drukgradiënt in het zout wordt namelijk door vloeï gerelaxeerd. Dit betekent dat breuken in het gesteente onder het zout (thick-skin tectonics) meestal niet doorzetten in het zout zodat de deformatie boven en onder de Zechstein ontkoppeld (disharmonisch) is. Het deformeren van alleen de bovenste gesteentelagen van de aardkorst zoals in Noord-Nederland wordt "thin-skin tectonics" genoemd.

Zoutbewegingen zijn meestal lateraal of opwaarts gericht. De drijvende krachten zijn de differentiële bedekking, het dichtheidsverschil tussen het relatief lichte zout en het zwaardere afdekkende sedimentpakket en tektonische spanningen (Koyi, 1988).

De meeste zoutstructuren in het kaartbladgebied zijn, net zoals de zoutstructuren in en om de zuidelijke Noordzee, gerelateerd aan breuken in het onderliggende gesteente (Jenyon, 1986; Jaritz, 1987; Koyi, 1991; Remmelts, in druk). Oorspronkelijk werd verondersteld dat de opwaartse kracht die het zout ondervindt, door de geringere dichtheid ($2,2 \text{ gr/cm}^3$) dan die van het afdekkende sedimentpakket (tot $2,4 \text{ gr/cm}^3$ bij voldoende compactie), voldoende was om zoutstructuren te doen ontstaan (Trusheim, 1957, 1960). Uit recent onderzoek is echter gebleken dat het afdekkende gesteentepakket te sterk is voor deze opwaartse kracht (VUA, 1992; Koyi et al., 1993). Deze belemmering kan worden opgeheven wanneer die sterkte door grootschalige breukbewegingen in het onderliggende gesteente (substraat) wordt gereduceerd. Figuur 11.3 laat in drie stappen het ontstaan van een zoutstructuur zien als gevolg van breukvorming in het substraat. Allereerst de Ausgangssituatie waarbij het zoutpakket op het substraat rust en wordt afgedekt door een sedimentpakket (fig. 11.3a). In deze situatie heerst een opwaartse kracht in het zout door het dichtheidscontrast met het sedimentpakket. Door de gelijkmatige bedekking is er echter sprake van een (instabiel) evenwicht. Wanneer extensie in het substraat leidt tot een afschuiving (fig. 11.3b.), veranderen een aantal aspecten in deze situatie. Allereerst leidt de breukbeweging tot verzwakking van het afdekkend pakket. Want hoewel de breukbeweging door het zout zal worden geacommodeerd, en zich niet direct doorzet in het afdekkend pakket, wordt dit pakket wel vervormd. Hierbij zullen rekspanningen resulteren in kleine breuken die het afdekkend pakket verzwakken. Ten tweede zal de evenwichtig verspreide druklast van het sediment op het zout worden verstoord. De sedimentatie neemt ongelijkmatig toe, in het afgeschoven gebied zal deze toename groter zijn dan aan de hoge kant van de breuk. Vanwege het hierdoor ontstane drukverschil zal het zout vanuit het diepe deel naar het hoge blok gaan vloeien alwaar het accumuleert (fig. 11.3c). Zoals bij het Groningen Hoog blijkt kan het effect van de breukvorming in het substraat ook gerealiseerd worden door een steile monoclinale structuur in het substraat. Een dergelijke accumulatie wordt een zoutkussen genoemd. Wanneer de accumulatie voortgaat en het afdekkend pakket doorbroken wordt, is er sprake van een zoutpijl (zie tabel 11.1).

Als voorbeeld is het zoutkussen Eems (16) te zien in figuur 11.4. Op dit seismisch profiel zijn de breuken in het substraat zichtbaar met aan de hoge kant daarvan de zoutstructuur. De breuken in het substraat zetten niet door in het afdekkend pakket en de deformatie onder en boven het zout is disharmonisch. Ook is duidelijk dat de differentiële bedekking van het zout ertoe heeft geleid dat vrijwel al het zout aan de afgeschoven zijde van de breuk is weggevoerd terwijl aan de hoge zijde van de breuk nog een vrij dik zoutpakket aanwezig is.

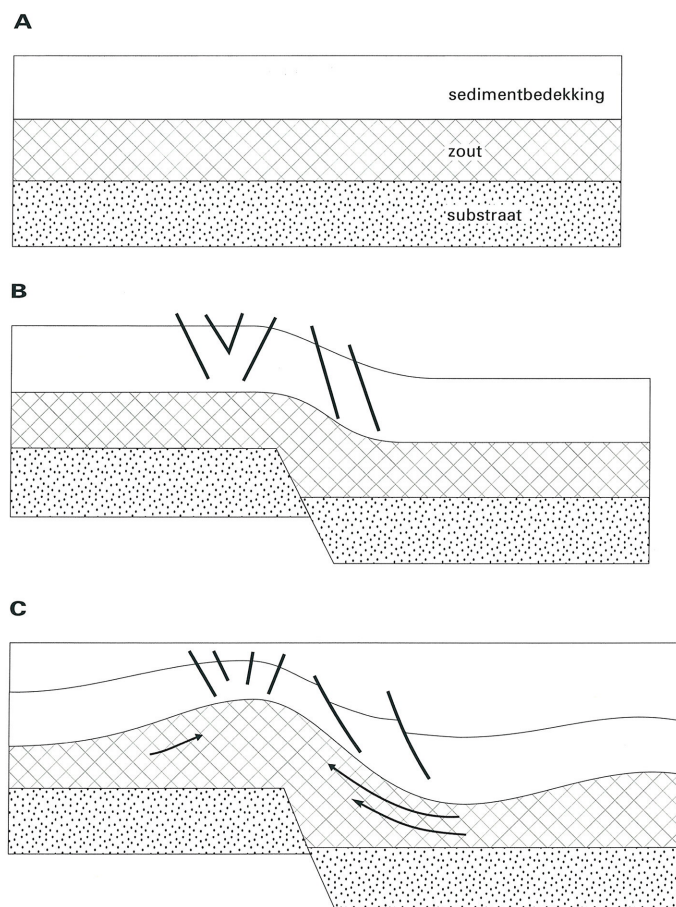
De relatie tussen de bewegingen langs de breuken in het substraat en de locatie van zoutstructuren valt goed te illustreren aan de hand van de dieptekaarten van de basis en de top van de Zechstein Groep (of aan de hand van de diktekaart van de Zechstein groep waarop zowel breuken in de basis als zoutstructuren zichtbaar zijn). Het merendeel van de zoutstructuren ligt langs de randen van het Groningen Hoog. Deze randen zijn grotendeels door breuken bepaald. De oriëntatie van de zoutstructuren is parallel aan die van de onderliggende breuken. Alleen de noordzijde van het hoog is niet breukbegrensd maar wordt bepaald door een steile monocline. Het resultaat is echter hetzelfde.

11.3.3 Groepen en individuele zoutstructuren

De zoutstructuren langs de noordoost- en oostrand van het Groningen Hoog zijn gerelateerd aan het ontstaan van het Eems Diep. Dit betreft de structuren 13 tot en met 19 (fig. 11.2) en de zoutstructuren

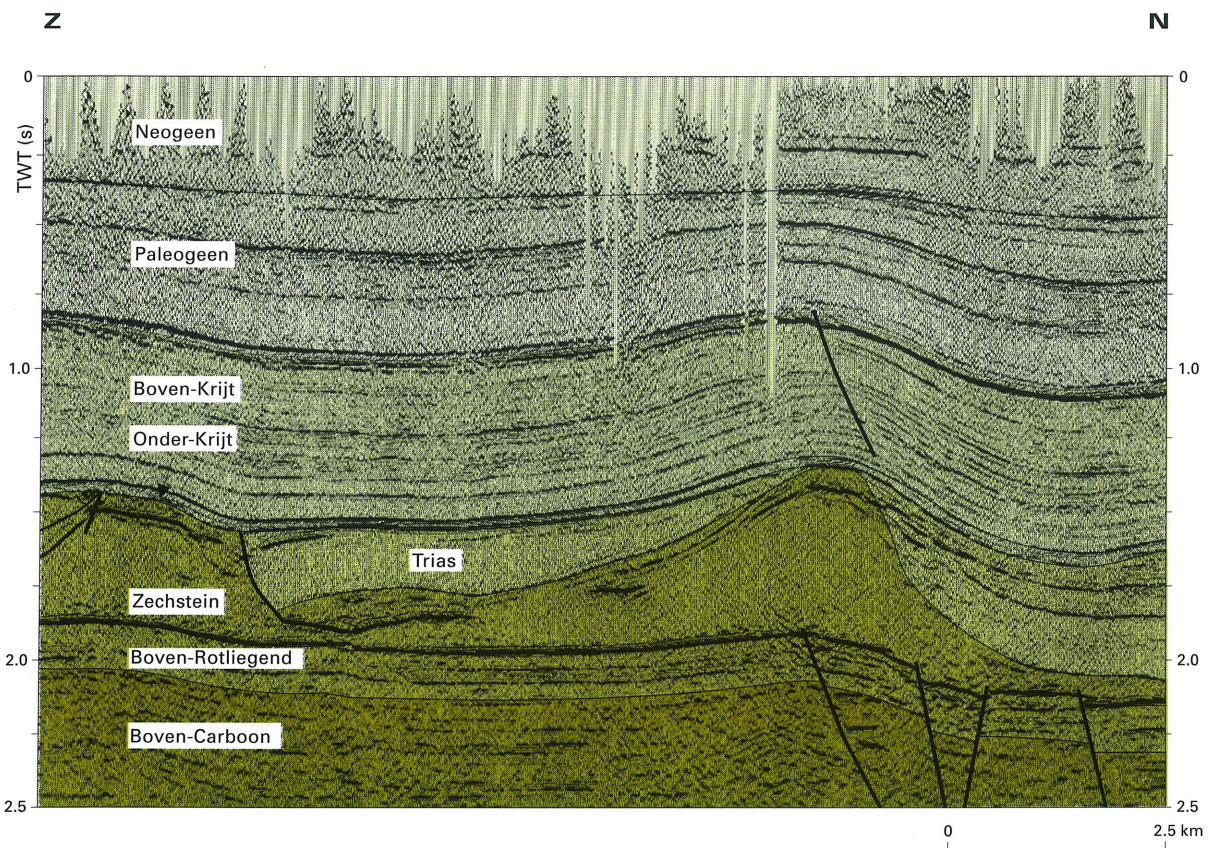
in het aanpalende Duitse gebied (Jaritz, 1987, 1992). Zij hebben een NNW-ZZO oriëntatie in het zuidoosten van het kaartbladgebied die naar het noorden toe overgaat in een meer NW-ZO richting. Van Klein-Ulsda (13) en Landschapspolder (14), en een aantal structuren in Duitsland (Jaritz, 1973) is aangetoond dat zij in eerste aanleg reeds gevormd zijn tijdens het Scythien (zoutkussen stadium), toen ook het Eems Diep een belangrijke rekfase doormaakte. Zoutbeweging blijkt uit het diep insnijden van de Basis Solling discordantie in de Onder-Bontzandsteen Formatie. Vermoedelijk hebben de zoutstructuren zich reeds gedurende de Keuper (Carnien-Norien) tot diapieren ontwikkeld. Sterke dikte-wisselingen binnen de Keuper afzettingen, bijvoorbeeld nabij de zoutpijler Klein-Ulsda, zijn hiervoor een aanwijzing. Voor de overige Nederlandse structuren van deze groep is, door de afwezigheid van Midden-Trias tot en met Boven-Jura afzettingen, moeilijk een uitspraak te doen omtrent de bewegingsfasen maar gezien de structurele context lijkt een tweede, latere bewegingsfase aan het einde van de Jura, gerelateerd aan de Laat-Kimmerische fase, aannemelijk. Onder andere Landschapspolder heeft in die periode het diapire stadium bereikt en reikte tot aan of dicht onder het oppervlak alwaar zich een hoedgesteente of caprock vormde. Onder-Krijt afzettingen liggen transgressief op de structuur. Tijdens het Laat-Krijt (Santonien-Campanien) begonnen Klein-Ulsda en Landschapspolder opnieuw te bewegen; hiervan getuigen interne discordanties in het tegelijkertijd afgezette sedimentpakket. Aan de flanken van Klein-Ulsda transgredeert het jongste Boven-Krijt op de structuur, maar nabij de top is dat eveneens geërodeerd. Gedurende grote delen van het Laat-Krijt heeft de structuur tot zeer dicht onder of zelfs tot aan het oppervlakte gereikt; vermoedelijk heeft zich in deze tijdspanne op Klein-Ulsda een

Figuur 11.3 Schematisch model voor de ontwikkeling van de zoutstructuren in relatie tot breukbewegingen in het substraat.



caprock gevormd. Nadien vonden tijdens het jongste Eoceen en Oligoceen en gedurende het Neogeen nog slechts geringe bewegingen plaats. De inzakkingsstructuur in het afdekkend pakket boven Klein-Ulsda is waarschijnlijk toe te schrijven aan een combinatie van oplossing van steenzout en mogelijk terugvloeden van het zout.

Het zoutkussen van Delfzijl (20) is, blijkens de begrenzing, aan de oostzijde beïnvloed door een NNW-ZZO breuk in het substraat, de rest van de structuur heeft een NO-ZW oriëntatie die niet aan een breuk in de directe omgeving kan worden gerelateerd. Het ontstaan van deze structuur moet wellicht meer gezien worden als een reactie op de vorming van de omliggende structuren. De oriëntatie is anders dan die van het Eems Diep, zij komt meer overeen met die van het Nedersaksisch Bekken dat ontstond tijdens de Laat-Jura. De structuur Bierum heeft een WNW-OZO oriëntatie en is gerelateerd aan breuken met een gering verzet. Dit uit zich in een minder vergevorderde ontwikkeling van de structuur. De zuidoostelijke punt van de structuur is het sterkst ontwikkeld. Dit komt enerzijds omdat daar de breuk in het substraat het grootste verzet heeft en anderzijds omdat daar het zout zowel uit noordelijke als zuidelijke gebieden naar toe is gestroomd. De zoutstructuur bevindt zich namelijk op



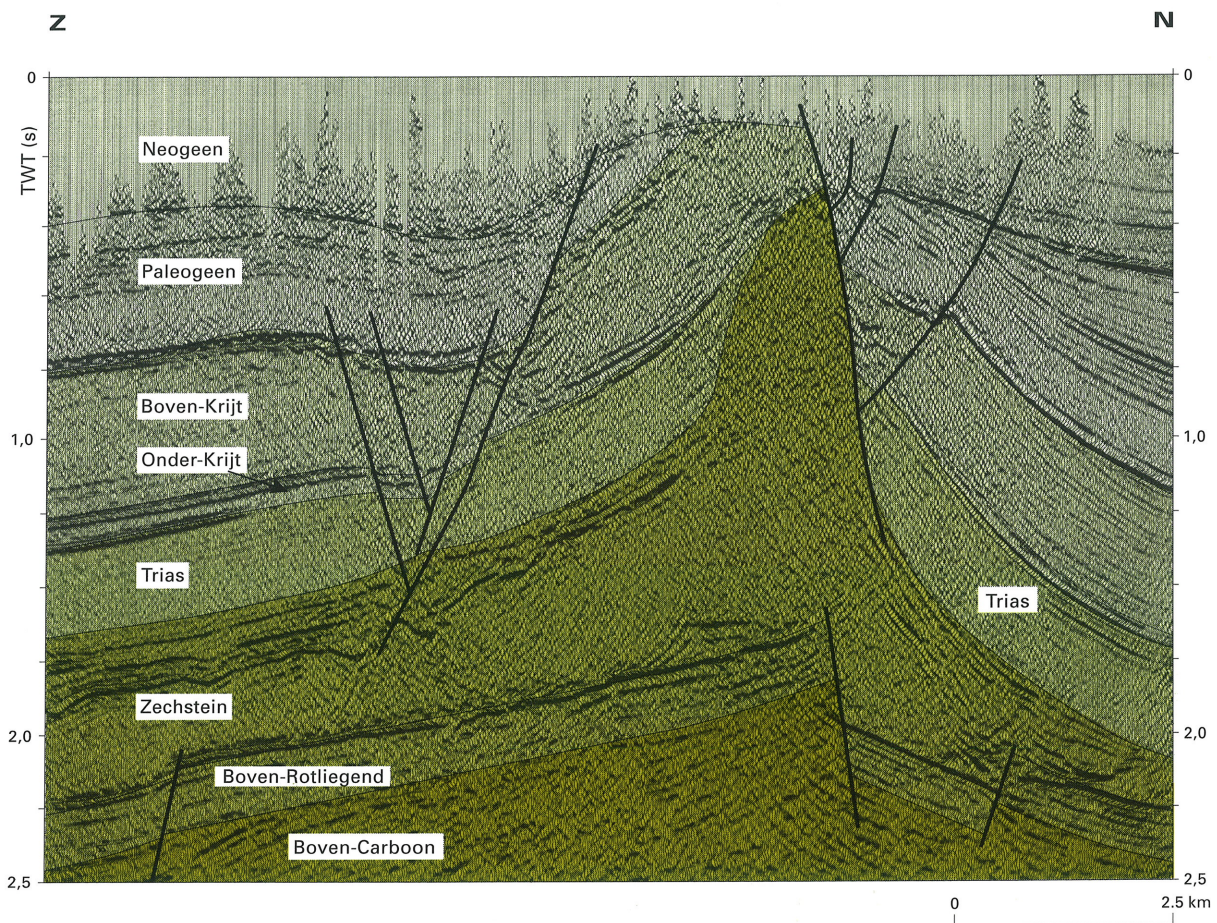
Figuur 11.4 Seismisch profiel door het Eems zoutkussen, gelegen aan de rand van het Groningen Hoog.

een horstvormige uitloper van het Groningen Hoog. In het noordwesten van Bierum is te zien dat de structuur vóór het Krijt is gevormd. Dat valt te verklaren door mogelijke extensie van het afdekkend pakket waarna het zout ruimte kreeg om naar boven te vloeien. De erosie aan het begin van het Krijt heeft de structuur aangesneden, hetgeen tot oplossing van grote hoeveelheden zout heeft geleid. Sinds het begin van het Krijt heeft deze structuur niet meer bewogen. De structuur Eems (fig. 11.2) is gerelateerd aan de eigenlijke rand van het hoog. Vanuit de zuidelijke punt van de structuur lopen breuken in noordwestelijke en noordelijke richting die beide vergezeld gaan van een zoutstructuur. De zoutstructuren in de Waddenzee (met name 1 en 2) zijn beïnvloed door N-Z geörienteerde breuken gerelateerd aan het Eems Diep. Naar het westen toe (Groninger Wad I) is de invloed van de Lauwerszee Trog echter dominant.

De zuidwestelijke rand van het Groningen Hoog laat een dubbele rij zoutstructuren (4 t/m 11 en 21) zien waarvan de buitenste rij het sterkst is ontwikkeld (Kaart 3). De oorzaak van deze dubbele rij is terug te vinden in de structuur van het substraat. De stap van de Lauwerszee Trog naar het hoog verloopt in twee treden. Allereerst een steile monocline naar een horst, en vervolgens een half-graben met de breukbegrenzing aan de zijde van het Groningen Hoog (Kaart 2). Door het hiaat in het afdekkende gesteentepakket kan van deze structuren niet worden bepaald wanneer zij gevormd zijn. Gezien het discordante contact tussen het Onder-Krijt en de Trias in de omgeving van de zoutstructuren, is het in elk geval pre-Krijt. Het is waarschijnlijk dat de zoutbeweging gerelateerd is aan de Laat-Kimmerische fase. In elk geval zijn er tijdens het Laat-Krijt (Campanien) en rond de overgang van het Eoceen naar het Oligoceen fasen van versterkte zoutvloeï geweest. Dit blijkt uit de sterke verdunning van de corresponderende sedimentpakketten (Kaarten 12 & 13). De structuur Ten Post (21) bestaat uit een viertal zoutaccumulaties. Hun positief reliëf is ontstaan door onttrekking van zout door andere structuren in de directe omgeving. Er is echter nauwelijks zout naar de structuren zelf gevloeï. Zij liggen ook op een relatief ongestoord deel van het Groningen Hoog. Bij de structuur Groningen vonden de eerste bewegingen reeds plaats vóór het Krijt. Tijdens het Laat-Krijt, vermoedelijk in samenhang met de Subhercynische fase, treedt een nieuwe periode van versterkte zoutbeweging op. Binnen de Boven-Krijt afzettingen (rond Laat-Campanien) bevindt zich een interne discordantie waarboven zich Maastrichtien sedimenten bevinden. Tijdens het Paleoceen en het vroege Eoceen vonden geen verdere bewegingen plaats, maar tijdens het jongere Eoceen en Oligoceen ontstond een breukzone in het afdekkend pakket. Deze listrische breuk loopt naar beneden toe over de flank van de zoutstructuur waarbij het afdekkend pakket over het zout afgegleden is. Het ZW deel van de structuur is sterker omhoog gestuwd dan het NO deel, waardoor er meer erosie cq. minder sedimentatie optrad. Tijdens het Paleoceen werd zodoende de basis van het Tertiair 150 m verzet langs deze breuk. De bewegingen hebben zich tot in het Neoceen voortgezet, maar de basis van de Neogene afzettingen vertoont langs de breuk slechts een verschil in diepteligging van circa 50 m. Het zoutkussen Hoogezand (8) wordt eveneens door een asymmetrische structuur van het afdekkend pakket gekenmerkt. Het ontstaan van de breukzone heeft plaatsgevonden tijdens het Laat-Krijt, eveneens samenhangend met de Subhercynische fase. Het verschil in beweging langs deze breuk bedroeg enkele tientallen meters. Tijdens het Paleoceen en Eoceen vond aanvankelijk geen verdere zoutbeweging plaats. In de loop van het Eoceen en het Oligoceen nam de zoutbeweging toe. Bij deze structuur vond echter, in tegenstelling tot de Groningen structuur (6), opwaartse beweging plaats van de NE flank. Tijdens het Paleoceen werd de basis van het Tertiair circa 150 m verzet. De basis van het Neoceen werd nog circa 100 m verzet, hetgeen het waarschijnlijk maakt dat deze structuur nog steeds beweegt.

De noordzijde van het Groningen Hoog wordt gemarkeerd door de structuren Pieterburen (fig. 11.5) en Groninger Wad I. Met name de eerstgenoemde structuur is sterk ontwikkeld en heeft een top die zich op slechts 150 m onder het maaiveld bevindt. Onder de structuur is in het substraat een duidelijke afschuiving zichtbaar. De eerste zoutbewegingen zijn als gevolg van intensieve erosie in de omgeving

van Pieterburen niet goed te dateren; de erosie van de Onder-Bontzandsteen Formatie op de locatie van de huidige zoutstructuur, aan het begin van het Krijt, betekent dat toen reeds een zoutstructuur Pieterburen bestond. Sterke bewegingen vonden met name plaats tijdens het Laat-Paleoceen en Vroeg-Mioceen waardoor de structuur wederom zeer dicht onder het aardoppervlak gelegen heeft. Op de top van de structuur komen slechts de jongste Tertiaire afzettingen voor. In het Kwartair zijn er aanwijzingen dat de aanwezigheid van de zoutstructuur van invloed was op de ligging van de kustlijn in dit gebied (Zagwijn, 1990). Extensie in het afdekkpakket als gevolg van de stijging van het zout, heeft geleid tot compensatie door slenkstructuren aan weerszijden van de top van de zoutstructuur. De oriëntatie van de structuur Pieterburen vertoont twee dominante richtingen: een min of meer WNW-OZO oriëntatie, gerelateerd aan de sterk hellende noordzijde van het Groningen Hoog (Kaart 2), en een NW-ZO oriëntatie gerelateerd aan de breukrichting die de westzijde van het hoog markeert.



Figuur 11.5 Seismische profiel over de zoutpijler Pieterburen. Opvallend is de breuk in het substraat. Aan de zuidzijde van de zoutstructuur is een slenk ontstaan

als gevolg van zoutdepletie in het Neogeen. Verdunning van het Boven-Krijt en het Paleogeen reflecteren de belangrijkste fasen van beweging.

De top van de structuur komt overeen met het snijpunt van de twee zijden van het Groningen Hoog. In tegenstelling tot de overige randen van het Groningen Hoog is de begrenzing in het noorden niet over de gehele lengte aan een breuk gerelateerd maar deels aan een steile monocline. Dit heeft een differentiële bedekking van het zout opgeleverd en ook hier is het afdekkend pakket door extensie verzwakt. Dit betekent dat hetzelfde ontstaansmodel voor zoutstructuren kan worden toegepast. Door Harsveldt (1980) werd verondersteld dat de structuur Pieterburen aan overschuivingen gerelateerd zou zijn. Moderne seismiek geeft geen uitsluitsel omtrent de interne structuur van het Zechstein zout, maar het is gezien de configuratie van de hoofdbreuken, zowel in de top van de zoutstructuur als aan de basis van de Zechstein, aannemelijk dat de breuken afschuivingen zijn (fig. 11.5). De door Harsveldt (1980) geïnterpreteerde verdubbeling in het steenzout wordt tegenwoordig aan halo-kinetische vervorming toegeschreven.

Boven de zoutstructuren Pieterburen en Groningen Wad I komen relaxatie-breuken in het afdekkend pakket voor. Deze afschuivingen zijn waarschijnlijk ontstaan nadat de compressieve krachten, gerelateerd aan de Pyreneïsche fase, waren afgenomen. Gezien het feit dat zij tot ongeveer 150 m onder het maaiveld reiken duidt op (geologisch) recente activiteit.

De zuidelijke rand van het Groningen Hoog is aanzienlijk complexer dan de noordelijke. Hier interfereren de breuksystemen van de Lauwerszee Trog (NW-ZO) met die van het Eems Diep (NNW-ZZO) en het systeem van het Nedersaksisch Bekken (O-W). Dit wordt gereflecteerd in de zoutstructuren door een sterke variatie in oriëntatie. Een en ander geldt met name voor de structuren Hoogezand (8) en Winschoten (12). Ook hier is de datering van de eerste bewegingen onmogelijk door het hiaat in de sedimentaire sequentie dat een aantal tijdvakken en tectonische fasen omvat. Wel is duidelijk dat de Laat-Kimmerische fase een belangrijke periode is geweest waarbij een aantal structuren het diapire stadium hebben bereikt (bijvoorbeeld Winschoten). Tijdens deze fase ontwikkelde zich het Nedersaksisch Bekken en werden de overige breuksystemen ge(re)activeerd. De top van de structuur Winschoten, gelegen binnen de steenzoutconcessie 'Adolph van Nassau' van AKZO-Nobel ligt op ca. 500 m diepte en de directe bedekking van de caprock door de Rijnland Groep geeft aan dat ook deze structuur tijdens het Vroeg-Krijt aan de oppervlakte gelegen moet hebben. Tijdens het Vroeg- en Laat-Krijt vonden aanvankelijk geen bewegingen plaats van het steenzout, maar gedurende het Campanien begon Winschoten zich duidelijk als positief reliëf-element te manifesteren. Aan het einde van het Krijt bevond de structuur zich zeer dicht onder het maaiveld. Na het oudste Paleoceen en Eoceen waarin geen of nauwelijks zoutbeweging optrad, intensiverde de opwaartse beweging van Winschoten tijdens het Laat-Eoceen en Oligoceen. De aanwezigheid van een secundaire randsyncline aan de zuidzijde van de structuur geeft aan dat er tijdens deze periode diapirisme optrad. Als gevolg hiervan is het pakket van Laat-Krijt en Paleoceen ouderdom boven de structuur in dikte gereduceerd. De diepte van de basis van de Neogeen afzettingen wijst op een stijging van ca. 100 m. De oriëntatie van de structuur Winschoten vertoont een interferentie van een drietal structurele richtingen (Kaart 2): de N-Z richting van het Eems Diep, de NW-ZO richting van de Lauwerszee Trog en de meer O-W richting van het Nedersaksisch Bekken.

11.4 Geochemische evaluatie en begravingsgeschiedenis

11.4.1 Inleiding

Het reusachtige Groningen gasveld en de omliggende kleinere velden zijn gevuld met gas, dat overwegend uit methaan bestaat. Dit gas heeft in het Groningen gasveld een tamelijk constante samenstelling. Het Groningen gas is afkomstig uit de onderliggende koolhoudende strata van de Limburg Groep (Boven-Carboon) en met name uit de afzettingen van de Caumer Subgroep (Westfalen)

A-B). Het percentage kool in de Caumer Subgroep bedraagt ca 4% van het totaal. In het studiegebied varieert de dikte van de Caumer Subgroep van 1000 tot 1500 m.

Met behulp van een model voor de begravingsgeschiedenis kan het inkolingsverloop van het gasmoedergesteente in een boring worden bepaald. De begravingsgeschiedenis is af te leiden uit de doorboorde stratigrafische sequentie. Voor de hiaten in de opeenvolging worden aannamen gedaan, die gebaseerd zijn op de dikteontwikkeling van de stratigrafische eenheden elders. Het met het model berekende inkolingsverloop dient te worden geïkt aan de petrografische en geochemische metingen die aan de organische bestanddelen van de gesteenten uit de betreffende boring zijn gedaan. Als het inkolingstraject voor een bepaalde periode is vastgesteld kan men vervolgens het verloop van de gasgeneratie uit de moedergesteenten bepalen.

De reconstructie van de begravingsgeschiedenis van het kaartbladgebied is complex. Er zijn meerdere deformatiefasen geweest. Mede daardoor bestaan er diverse hiaten in de sedimentaire geschiedschrijving. Verder zijn de halokinetische bewegingen een complicerende factor (Kaart 4; fig 11.2). De belangrijkste geologische onzekerheden bij de modellering zijn: (1) de hoeveelheid geërodeerde Westfalen-Stefanien afzettingen, (2) de hoeveelheid geërodeerde Trias-Jura afzettingen, (3) de in de geologische tijd variërende dikte van het Zechstein zout als gevolg van halokinese en (4) de paleo-warmtestroom.

Bij het bepalen van de begravingsgeschiedenis is uitgegaan van een totale dikte van het Westfalen en Stefanien van ca. 2500 m (Caumer, Dinkel en Hunze Subgroep). De oorspronkelijke dikte van het Zechstein pakket in het kaartbladgebied zal 700 tot 800 m hebben bedragen. In de modellen is, waar nodig, een geleidelijke diktegroei van de zoutafzettingen aangenomen. Het Zechstein zout en met name de vloeï ervan hebben effect gehad op de inkoling van de onderliggende strata. Zoutpijlers en -kussens fungeerden vanaf de Jura of later (paragraaf 11.3) als 'schoorstenen' van hoge warmteafvoer als gevolg van de grote warmtegeleidingscapaciteit van zout. Omdat dit de inkoling van de onderliggende strata beïnvloedde is dit zgn. 'schoorsteen effect' in de modellen verwerkt. De dikte van de Trias kan in het Eems Diep oplopen tot ca. 2000 m, maar neemt naar het Groningen Hoog snel in dikte af tot ca. 1000 m. Per put is, afhankelijk van de locatie, een waarde binnen dit interval gekozen. Tenslotte is bij de modellering uitgegaan van twee fasen van een verhoogde warmtestroom, in het Carboon en de Jura. De warmtestroom nam snel toe tot ca. 60 mW/m² waarna een logaritmisch verval werd aangenomen.

Van diverse boringen binnen het kaartbladgebied is het organisch materiaal uit de gesteenten van de Limburg Groep en de Koperschalie (Zechstein Groep) bestudeerd (Tabel 11.2; RGD, 1994) ten einde het begravingsmodel te toetsen. Inkolingsgegevens werden bepaald aan de hand van diverse inkolingsparameters zoals vitrinietreflecties, RockEval Tmax (Veld et al., 1993; Veld, 1995), en diverse geochemische indexen. Van de Koperschalie werd tevens de activatie-energieverdeling van enkele monsters bepaald. Deze gegevens werden gebruikt om de geschiedenis van olie- cq gasgeneratie in het studiegebied te reconstrueren.

11.4.2 Resultaten

De geochemische modellering heeft betrekking op het zuidoostelijke deel van het kaartbladgebied, een gebied van 40x40 km. Vijf boringen leverden betrouwbare vitriniet-reflectiemetingen van de Limburg Groep (Tabel 11.2). De verticale inkolingsstrend in de boring Tjuchem-2 (1,23 % Rr/km) werd gebruikt voor extrapolatie van reflectiegegevens naar de top van de Limburg Groep (fig. 11.6). Samen met gegevens die beschikbaar zijn rond het kaartbladgebied (Rijks Geologische Dienst, 1991a, 1993a,

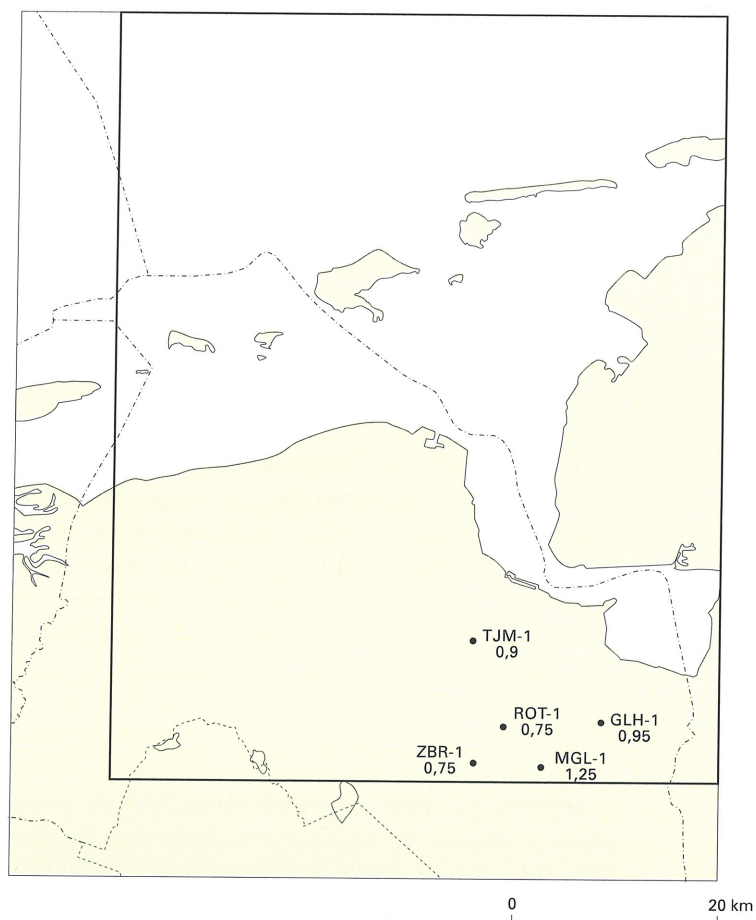
1993b; Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1984; Teichmüller et al., 1985) leveren deze gegevens een beeld van toenemende inkoling van de top van de Limburg Groep naar het noorden toe.

De boring Heiligerlee-1 heeft een relatief hoge vitrinietreflectie van ca. 1,1% aan de top van de Limburg Groep, waarvoor geen duidelijke verklaring is gevonden. Sterke lokale Varistische opheffing en erosie, lokale verwarming door een intrusief lichaam of een lokaal grote Jura bekkendaling zijn hier mogelijke oorzaken.

Van vier boringen is de Koperschalie geanalyseerd (Tabel 11.2). Reflectie-metingen zijn hierbij verricht aan het frequent voorkomende bituminiet. De genese van dit maceraal is wezenlijk verschillend van vitriniet waardoor een directe vergelijking van de inkolingsgegevens van Koperschalie met de Limburg Groep niet mogelijk was. De data worden hier gepresenteerd, zonder er op dit moment conclusies aan te verbinden.

De begravingsgeschiedenis van het Groningen Hoog en de daaruit afgeleide koolwaterstoffen-generatie wordt geïllustreerd aan de hand van de boring Roode-Til-1 (fig. 11.7a, b). De eerste inkolings-fase vindt plaats aan het eind van het Carboon. Voor vrijwel alle boringen geldt dat er geen gas-expulsie is opgetreden tijdens het Carboon. Alhoewel de aanname van de totale afzettingsdikte van het Westfalien en Stefanien (2500 m) tamelijk arbitrair is, verandert de expulsie van koolwaterstoffen niet

Figuur 11.6 Reflectiewaarden (R_r) aan de top van de Limburg Groep, incl. locaties van boringen in Tabel 11.2. De reflectiewaarden van Tabel 11.2 zijn naar de top geëxtrapoleerd (zie tekst).



wezenlijk als de aangenomen dikte binnen ruime marges wordt gevarieerd. De maximale begravingsdiepte was gedurende het Carboon niet voldoende om olie of gas in significante hoeveelheden te generen. Na opheffing en gedeeltelijke erosie van het Westfalen blijven nog 1000 tot 1500 m steenkoolvoerend Westfalen over als moedergesteente voor latere fasen van koolwaterstofgeneratie.

Tabel 11.2

Tabel 11.2 Vitrinitreflecties (%Rr), populatiegrootten (n) en standaardafwijkingen (s.d.) van de monsters.

<i>Boring</i>	<i>tvd</i>	<i>groep</i>	<i>%Rr</i>	<i>n</i>	<i>s.d.</i>
GLH-1	2990	Zechstein	0,45	50	0,114
	3187	Limburg	1,01	50	0,037
	3377	Limburg	1,07	50	0,050
	3387	Limburg	1,10	50	0,050
HAR-1	3108,5	Zechstein	0,33	50	0,089
HGL-1	2884	Limburg	1,27	60	0,313
ROT-1	2775	Limburg	0,73	50	0,039
	2777	Limburg	0,82	50	0,027
	2787	Limburg	0,89	50	0,032
	2792	Limburg	0,79	50	0,040
SLO-1	2645	Zechstein	0,37	50	0,059
TBR-1	2767	Zechstein	0,84	50	0,111
TJM-2	3544,5	Limburg	1,70	50	0,154
	3833	Limburg	2,26	50	0,162
	4170	Limburg	2,16	50	0,456
	4304	Limburg	2,39	13	0,262
	4902	Limburg	3,69	10	2,320
	5702	Limburg	4,53	4	0,950
	5912	Limburg	4,68	14	0,499
ZBR-1	2773	Limburg	0,81	50	0,045
	2779	Limburg	0,77	50	0,032
	2792	Limburg	0,72	50	0,026
	2796	Limburg	0,78	50	0,051

tvd = werkelijke verticale diepte

De tweede fase van inkoling vindt plaats gedurende de Laat-Jura. Door een combinatie van verhoogde warmte-stroom en diepe begraving tijdens de Kimmerische rift-fase werden significante hoeveelheden gas gegenereerd. Kwantitatieve analyses wijzen uit dat dit de hoofdfase van koolwaterstofvorming in het gebied is. Er blijken echter aanzienlijke verschillen op te treden in de gesimuleerde hoeveelheden koolwaterstof per boring. De methaan-expulsie varieert van 0,1 tot 5,5 miljard m³/km². Met name het

westen en het zuiden van het kaartbladgebied laten een hoge gasgeneratie zien (fig. 11.8a: Ten Boer-1 en Heiligerlee-1). De totale koolwaterstofgeneratie tijdens de Laat-Jura varieert van 1 tot 16 miljoen ton/km².

De derde fase van koolwaterstofgeneratie vangt tijdens het Tertiair aan. De Kenozoïsche methaan-generatie varieert van 0 tot 1,8 miljard m³/km². In het zuidwesten (Haren-1) laat de modelstudie zien dat een aanzienlijke methaangeneratie optreedt. De algemene trend is een relatief grote methaan-generatie om het Groningen Hoog heen (Lauwerszee Trog, Eems Diep; fig. 11.8b). De totale koolwaterstof-generatie tijdens het Kenozoïcum varieert tussen 0 en 7,4 miljoen ton/km².

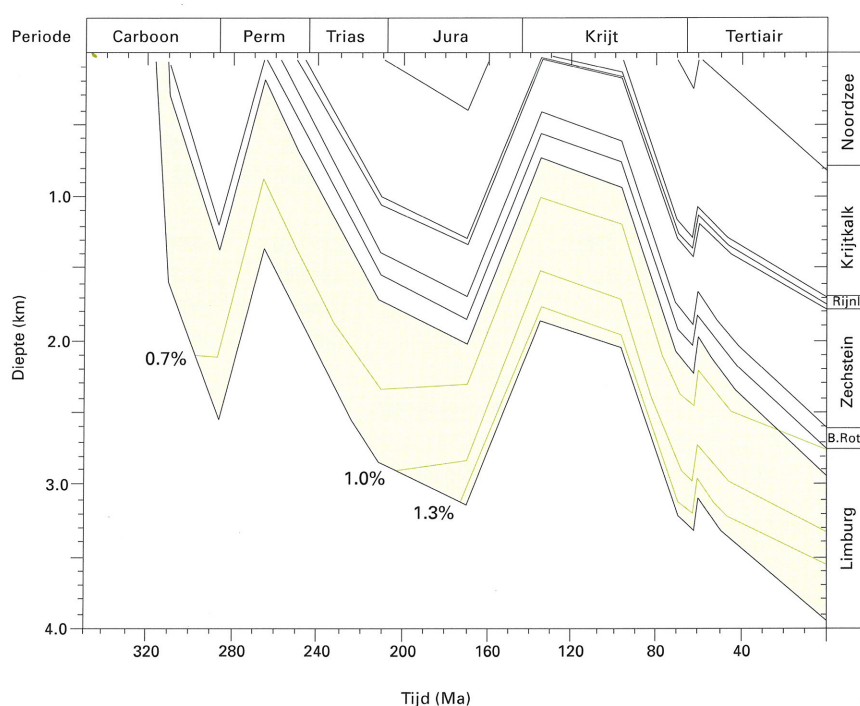
Tabel 11.3 Gassamenstelling van het Groningen gasveld.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7plus	C	N2	H2S
81.24	2.89	0.41	0.15	0.04	0.02	0.05	0.93	14.26	0.00

Er bestaat een grote discrepantie tussen de samenstelling van de gegenereerde koolwaterstoffen uit de Westfalien-kolen en de samenstelling van de geaccumuleerde gassen. In onderstaande tabel is de gassamenstelling uit de gasreservoirs van Slochteren-01 als representatief voor het Groningen gasveld weergegeven.

De moedergesteenten hebben een relatief hoge opbrengst aan extracten gekarakteriseerd door dominantie van aromatische componenten en asfaltenen. De modelstudie laat eveneens zien dat een relatief grote hoeveelheid hogere koolwaterstoffen uit de afzettingen van Limburg Groep verwacht mag worden (fig. 11.7b). De gassen hebben echter een relatief geringe hoeveelheid condensaten en hogere koolwaterstoffen. Deze discrepantie komt zeer waarschijnlijk voort uit segregatie tijdens

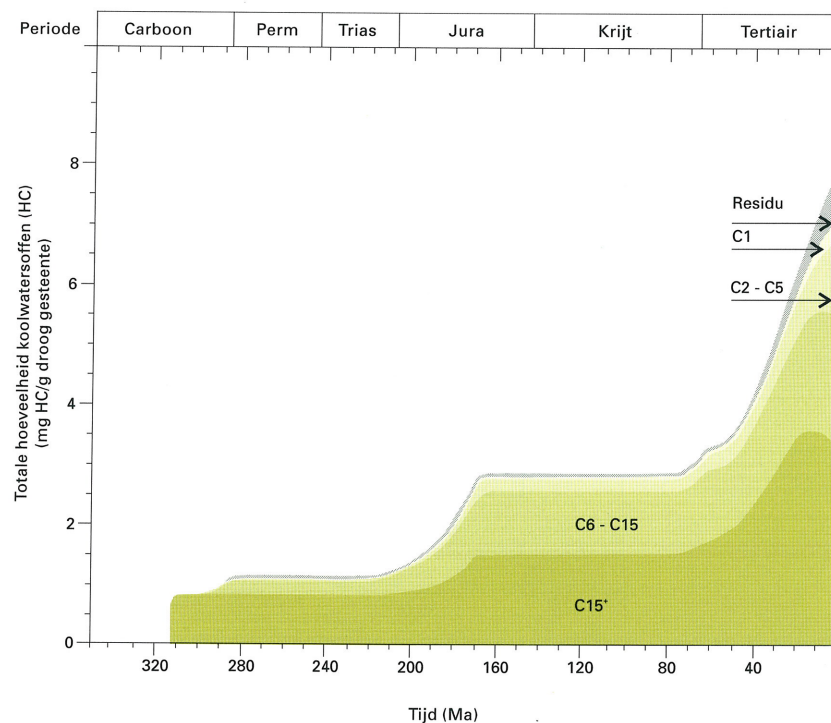
Figuur 11.7a Begravingsdiagram van de boring Roode-Til-1. Gasgeneratie vindt plaats in koollagen die zich in het 'gasvenster' bevinden (%Rr: 0,9-1,3). In het Westfalien van de boring Roode-Til-1 is er sprake van gasgeneratie gedurende de Jura en het Kenozoïcum.



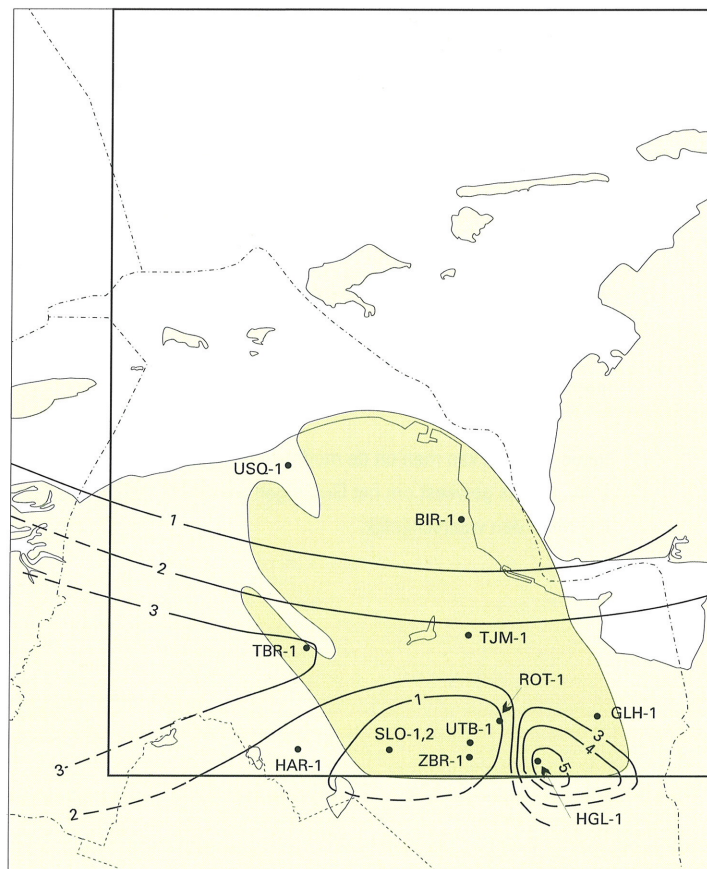
migratie. De kool heeft de neiging om zwaardere, aromatische componenten tegen te houden (terwijl de lichtere componenten relatief snel migreren). Ook kunnen koolwaterstoffen door secundaire kraakprocessen omgevormd worden tot enerzijds een grotere fractie residu en anderzijds een additionele fractie methaan en condensaten.

Samenvattend kan men uit de modelstudie concluderen dat de gasgeneratie tijdens de Jura ruim voldoende is geweest om het Groningen gasveld te vullen. Additionele gassuppletie tijdens het Tertiair lijkt meer dan waarschijnlijk.

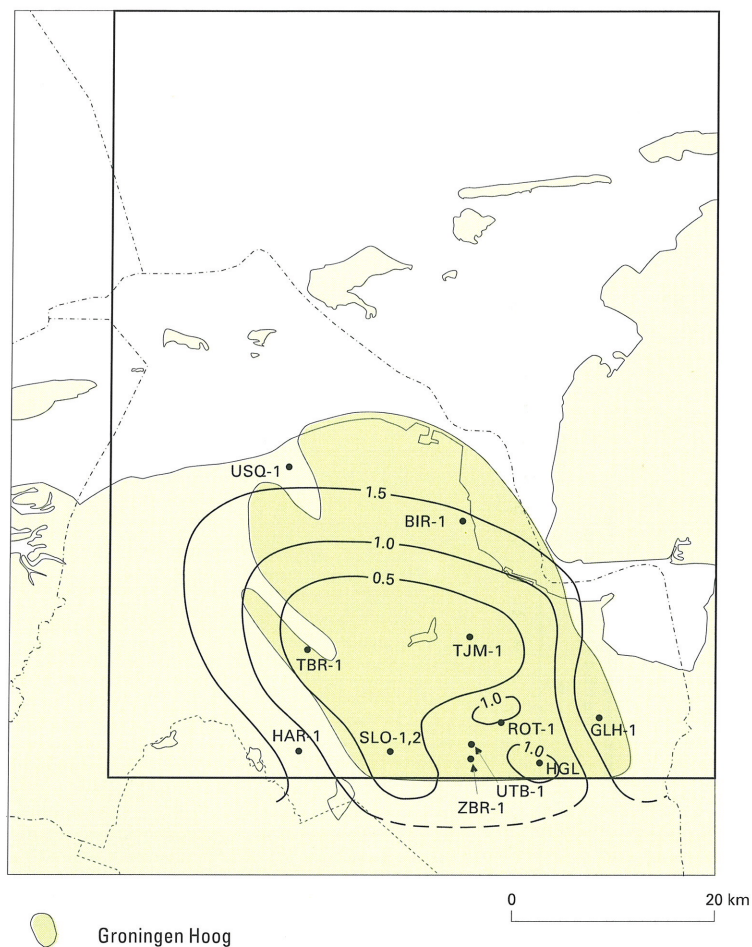
Figuur 11.7b Koolwaterstoffengeneratie als functie van tijd in de boring Roode-Til-1.



Figuur 11.8a Contourkaart van de gasgeneratie gedurende de Jura (in $10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$) op kaartblad III. De grootste hoeveelheden gas zijn gegenereerd aan de randen van het Groningen Hoog. Het gas is onder het afsluitende Zechstein zout in de permeabele zandstenen van het Boven-Rotliegend geaccumuleerd.



Figuur 11.8b Contourkaart van de gasgeneratie gedurende het Kenozoïcum.



Appendices

Appendix A

Gebruikte seismiek

<i>Survey</i>	<i>Jaar</i>	<i>Eigenaar</i>	<i>2D/3D</i>
7120**	1971	NAM	2D
7190**	1971	NAM	2D
7270**	1972	NAM	2D
7590**	1975	NAM	2D
7892**	1978	NAM	2D
8**	1964	NAM	2D
PN7-85-16A	1985	Placid	2D
Eemsmonding	1985	NAM	3D
Grootegast	1985/1986	NAM	3D
Groningen Westflank dl1 en dl 2	1986/1987	NAM	3D
Groningen stad	1987	NAM	3D
Groningen veld	1988	NAM	3D
Lauwerszee	1983	NAM	3D
Uithuizen	1988	NAM	3D

** staan voor specifieke lijnnummers

NAM = Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Appendix B

Overzicht gebruikte boringen¹

<i>No.</i>	<i>Naam boring</i>	<i>Code</i>	<i>Eigenaar</i>	<i>Einddiepte (logdiepte)</i>	<i>Jaar (van beëindiging)</i>
1	Allardsoog-1	ALO-01	NAM	3180	1984
2	Amsweer-1	AMR-01	NAM	2974	1972
3	Annerveen-1	ANN-01	NAM	3057	1973
4	Annerveen-5	ANN-05	NAM	3060	1984
5	Annerveen-Anlo-1	ANA-01	NAM	3014	1962
6	Annerveen-Schuilingsoord-1	ANS-01	NAM	3190	1970
7	Annerveen-Veendam-1	ANV-01	NAM	3217	1969
8	Annerveen-Wildervank-1	WDV-01	NAM	3188	1967
9	Bedum-1	BDM-01	NAM	3566	1977
10	Bierum-1	BIR-01	NAM	3029	1963
11	Blijham-1	BHM-01	NAM	3502	1972
12	Blijham-2	BHM-02	NAM	4055	1979
13	Barnheem-1	BRH-01	NAM	3102	1973
14	Boerakker-1	BRA-01	NAM	3262	1984
15	Bolderij-1	BOL-01	NAM	2993	1972
16	Borgsweer-1 St2	BRW-01-S2	NAM	3363	1971
17	De Eeker-101	EKR-01	NAM	2745	1965
18	De Hond-1	HND-01	NAM	3277	1971
19	Delfzijl-1	DZL-01	NAM	3118	1960
20	De Paauwen-1	PAU-01	NAM	3397	1973
21	De Paauwen-2	PAU-02	NAM	3051	1985
22	Eemskanaal-1	EKL-01	NAM	3064	1970
23	Froombosch-1	FRB-01	NAM	2889	1966
24	Goldhoorn-1	GLH-01	NAM	4500	1980
25	Grootegast-1	GGT-01	NAM	3022	1961
26	Haren-1	HAR-01	NAM	3577	1953
27	Harkstede-1	HRS-01	NAM	3343	1977
28	Harkstede-2	HRS-02	NAM	3349	1980
29	Heiligerlee-1	HGL-01	NAM	3100	1982
30	Kooipolder-1	KPD-01	NAM	2994	1966
31	Leermens-7	LRM-07	NAM	3023	1975
32	Marumerlage-1	MAL-01	NAM	3152	1984
33	Meeden-1	MDN-01	NAM	3550	1983
34	Midlaren-1	MLA-01	NAM	3650	1985
35	Midwolda-1	MWD-01	NAM	2940	1965
36	Nieuw-Scheemda-1	NWS-01	NAM	2829	1965
37	Noordbroek-1	NBR-01	NAM	2889	1962
38	Norg-1	NOR-01	NAM	3329	1065
39	Oldorp-1	ODP-01	NAM	3539	1977
40	Oostwold-1	OLD-01	NAM	2985	1974
41	Opende-Oost-1	OPO-01	NAM	3100	1979

¹ De locaties van de genummerde boringen staan weergegeven in figuur 1.3.

Vervolg Appendix B

No.	Naam boring	Code	Eigenaar	Einddiepte (logdiepte)	Jaar (van beëindiging)
42	Oudeweg-1	OWG-01	NAM	3061	1971
43	Overschild-1	OVS-01	NAM	3014	1972
44	Pieterburen-1	PBN-01	KNZ	903	1972
45	Roden-101	ROD-101	NAM	3235	1970
46	Roden-102	ROD-102	NAM	3848	1976
47	Roode Til-1 St1	ROT-01-S1	NAM	2940	1968
48	Sappemeer-1	SAP-01	NAM	3027	1964
49	Schaapbulten-1	SCB-01	NAM	3131	1971
50	Schaaphok-1	SPH-01	NAM	2905	1966
51	Scheemderzwaag-101	SZW-101	NAM	3025	1966
52	Schildmeer-1	SMR-01	NAM	2969	1963
53	Schildwolde-1	SWO-01	NAM	3103	1973
54	Siddeburen-1	SDB-01	NAM	3037	1971
55	Slochteren-1	SLO-01	NAM	2709	1959
56	Slochteren-4	SLO-04	NAM	2987	1963
57	Slochteren-9	SLO-09	NAM	2857	1965
58	Spitsbergen-101	SPI-101	NAM	2997	1966
59	Stedum-1	SDM-01	NAM	3104	1966
60	Ten Boer-1	TBR-01	NAM	2890	1956
61	Ten Post-1	POS-01	NAM	3024	1972
62	Tjuchem-1	TJM-01	NAM	3083	1971
63	Tjuchem-2	TJM-02	NAM	5058	1972
64	Tusschenklappen-1	TUS-01	NAM	2836	1965
65	Uiterburen-1 St1	UTB-01-S1	NAM	2783	1966
66	Uiterburen-2	UTB-02	NAM	3220	1966
67	Uithuizen-1	UHZ-01	NAM	3131	1978
68	Uithuizerveeden-1 St1	UHM-01-S1	NAM	3331	1965
69	Usquert-1	USQ-01	NAM	3312	1968
70	Veelerveen-1	VLV-01	NAM	4191	1981
71	Veendam-1	VDM-01	SHL	1770	1972
72	Vries-4	VRS-04	NAM	3451	1985
73	Warffum-1	WRF-01	NAM	3621	1977
74	Westerdiep-1	WSD-01	NAM	3295	1973
75	Winschoten-1	WSN-01	KNZ	1000	1952
76	Winsum-1	WSM-01	NAM	3479	1979
77	Woudbloem-1	WBL-01	NAM	2996	1967
78	't Zandt-1	ZND-01	NAM	3020	1974
79	't Zandt-12	ZND-12	NAM	3300	1978
80	Zeerijp-1	ZRP-01	NAM	3125	1975
81	Zevenhuizen-1	ZVH-01	NAM	3270	1983
82	Zuidbroek-1	ZBR-01	NAM	3100	1980

Vervolg Appendix B

<i>No.</i>	<i>Naam boring</i>	<i>Code</i>	<i>Eigenaar</i>	<i>Einddiepte (logdiepte)</i>	<i>Jaar (van beëindiging)</i>
83	Zuiderveen-1	ZVN-01	NAM	3013	1966
84	Zuidlaarderveen-1	ZLV-01	NAM	3115	1975
85	Zuidlaren-1	ZLN-01	NAM	3338	1976
86	Zuidpolder-1	ZPD-01	NAM	3097	1970
87	Zuidwending-1	ZWD-01	NAM	3280	1974

St = Sidetrack

KNZ = Koninklijke Nederlandse Zoutindustrie N.V.

PET = Elf Petroland B.V.

NAM = Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

SHL = Shell Delfstoffen Nederland

Appendix C

Reservoirsommities Boven-Rotliegend Groep

De sommaties in de onderstaande tabellen zijn uitgevoerd over respectievelijk de gehele Boven-Rotliegend Groep (incl. Ten Boer en Ameland) de Slochteren Formatie, de Boven-Slochteren en de Onder-Slochteren. Toegepaste cut-off waarden: kleigehalte $V_{cl}(co)=50\%$; effectieve porositeit $\emptyset_e(co)=6\%$. De cut-off waarde van de effectieve porositeit is gebaseerd op kernegegevens. $\emptyset_{em}$ gemiddelde effectieve porositeit; V_{clm} gemiddeld kleigehalte. Bruto, Netto in meters; $\emptyset_{em}$ en V_{clm} in procenten. Boringen waarin van het betreffende traject niet het volledige traject werd geëvalueerd worden aangegeven met * (meestal ontbreekt een aantal meters in de top van de Ten Boer).

Boven-Rotliegend Groep

Put	Bruto	Reservoir		
		Netto	$\emptyset_{em}$	V_{clm}
ANN-5	126.7	101.0	12.8	22.5
* BDM-1	261.4	198.2	14.2	20.3
BHM-2	103.6	68.7	11.6	20.6
BRA-1	261.2	200.7	18.2	22.2
* GLH-1	115.7	82.8	14.3	25.9
* HGL-1	123.6	83.4	15.0	21.4
* HRS-2	134.6	107.4	16.6	24.2
* LRM-7	249.1	182.9	15.1	18.9
MLA-1	172.7	115.2	12.5	20.6
* ODP-1	292.0	207.7	18.2	16.2
* OVS-1	200.5	166.0	16.8	21.7
ROD-102	221.8	175.0	18.6	20.6
TJM-1	196.5	145.3	18.6	22.0
* UHZ-1	290.5	211.2	17.9	17.3
USQ-1	314.1	228.1	17.3	16.6
VRS-4	200.5	154.5	16.5	28.3
WRF-1	322.7	224.1	19.6	20.4
WSM-1	323.9	227.4	18.5	15.7
* ZND-1	240.5	202.7	17.7	17.2
* ZVH-1	205.7	177.2	20.4	16.0

Slochteren Formatie

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>		
		<i>Netto</i>	<i>Øem</i>	<i>Vclm</i>
ANN-5	113.8	99.8	12.7	22.3
BDM-1	205.2	196.2	14.2	20.0
BHM-2	71.4	68.7	11.6	20.6
BRA-1	204.8	197.4	18.2	21.9
GLH-1	91.8	82.6	14.3	25.9
HGL-1	95.0	83.4	15.0	21.4
HRS-2*	109.3	101.3	16.7	23.0
MLA-1	135.2	105.0	12.7	19.1
ROD-102	198.3	174.3	18.7	20.5
TJM-1	145.4	140.6	18.8	21.6
VRS-4	187.0	154.5	16.5	28.3
ZVH-1	161.1	159.0	21.5	13.7

Boven-Slochteren Laagpakket

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>		
		<i>Netto</i>	<i>Øem</i>	<i>Vclm</i>
LRM-7	90.7	88.5	16.0	20.5
ODP-1	101.2	96.1	20.0	17.2
OVS-1	85.2	82.6	18.3	25.1
UHZ-1	96.2	87.6	20.2	18.2
USQ-1	102.3	95.0	19.6	15.8
WRF-1	111.6	101.0	21.3	20.4
WSM-1	104.9	101.8	17.5	15.9
ZND-1	96.4	93.0	19.1	19.6

Onder-Slochteren Laagpakket

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>		
		<i>Netto</i>	<i>Øem</i>	<i>Vclm</i>
LRM-7	93.5	84.8	14.5	15.8
ODP-1	110.4	103.6	16.9	13.9
OVS-1	90.0	78.6	15.1	17.5
UHZ-1	125.5	116.5	16.5	15.5
USQ-1	125.9	119.7	16.4	14.8
WRF-1	122.8	113.5	18.5	18.9
WSM-1	122.8	107.5	19.7	14.2
ZND-1	109.9	100.1	16.7	13.2

Appendix D

Show, status en testgegevens Boven-Rotliegend Groep

GAS gasproductie; PRP productie proef (debiet gas, Q50, in 1000 m³/d; debiet water en condensaat in m³/d); RFT repeat formation tester (testinterval in meters logdiepte; hoeveelheden in liters); FIT formatie interval test (hoeveelheden in liters); G gas; W water; C condensaat; MF mudfiltraat; M mud; u bovenste kamer; l onderste kamer; ROSL Slochteren Formatie; ROSLU Boven-Slochteren Laagpakket; ROSLL Onder-Slochteren Laagpakket; ROCLT Ten Boer Laagpakket

<i>Put</i>	<i>Show</i>	<i>Status</i>	<i>Test</i>	<i>Interval</i>	<i>Opbrengst</i>	<i>Debiet</i>	<i>Eenheid</i>
ANN-5	gas	GAS	PRP	2922.0-3028.0	G	3760	ROSL
BDM-1	gas	GAS	PRP	3041.3-3113.5	G	715	ROSL
					W	5	
					C	7	
			RFT	3026.1-3256.0			ROCLT+ROSL
			FIT	3091.5	G	4.1	ROSL
					MF	1.4	
BHM-2	gas	GAS	PRP	3579.3-3641.3	G	445	ROSL
			RFT	3590.1-3640.5			ROSL
BRA-1	gas	GAS	PRP	2932.0-3001.5	G	2500	ROCLT+ROSL
					W		
					C		
			RFT	2938.2-3152.5			ROCLT+ROSL
			FIT	2985.0	G (u)	1.7	ROSL
					C (u)		
					MF(u)	0.2	
					G (l)	1.7	
					C (l)	0.2	
					MF(l)	1.1	
HGL-1	gas	GAS	RFT	2762.5-2798.0			ROSL
HRS-2	gas	GAS	PRP	3221.0-3270.1	G	3600	ROSL
					W	9	
					C	9	
MLA-1	gas	GAS	RFT	3174.8-3331.0			ROCLT+ROSL
			FIT	3212.5	MF	5.5	ROSL
OVS-1	gas	GAS	FIT	2832.0	G	3100	ROSLU
					M	1.5	
ROD-102	gas	GAS	PRP	3585.4-3674.8	G	2570	ROCLT+ROSL
					W	15	
					C	250	
USQ-1	gas	GAS	PRP	2970.0-2979.0	G	950	ROSLU
WRF-1	gas	GAS	PRP	3116.0-3123.0	G	4300	ROSLU
					W	15	
					C	61	
			FIT	3122.0	G	8.6	ROSLU
					MF	1.7	
ZND-1	gas	GAS	FIT	2846.5	G	671	ROSLU
					M	3.2	

Referenties

Literatuurreferenties

- Arthaud, F. & Matte P. (1977) *Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and North Africa; results of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals*. Geol. Soc. Am. Bull. 88, p. 1305–1320.
- Athy, F. (1930) *Density, porosity and compaction of sedimentary rocks*. AAPG Bull., vol.14, p. 1–14.
- Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (1991) *Inversion tectonics in the Northwest German Basin*. In: Generation, Accumulation and Production of Europe's Hydrocarbons (Spencer, A.M. ed.), Spec. Publ. E.A.P.G., No.1, Oxford University Press, p. 149–159.
- Bless, M.J.M., & Winkler-Prins, C.F. (1972) *Paleoecology and Paleogeography of the Aegir Marine Band and its equivalents in North-West Europe*. 72e C.R. Congr. Internat. Stratigr. Géol. Carbonif., Krefeld 1971, Vol.1, p. 231–239.
- Braitsch, O. (1971) *Salt deposits their origin and composition*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 297pp.
- Brüning, U. (1986) *Stratigraphie und Lithofazies des Unteren Buntsandsteins in Südniedersachsen und Nordhessen*. Geol. Jb, A90, p. 3–125.
- Coeleweij, P.A.J., Haug, G.M.W. & Van Kuijk, H. (1978) *Magnesium-salt exploration in the northeastern Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 57, p. 487–502.
- Coward, M.P. (1991) *Inversion tectonics in NW Europe*. Abstracts EUG VI, Strassbourg, p. 229.
- Crittenden, S. (1987) *The 'Albian transgression' in the Southern North Sea Basin*. Journ. Petr. Geol., vol. 10, p. 395–414.
- De Vries Klein, G. & Kupperman, J.B. (1992) *Pennsylvanian cyclothems: methods of distinguishing tectonically induced changes in sea level from climatically induced changes*. Bull. Geol. Soc. America, 104, p. 166–175.
- Donovan, D.T. & Jones, E.J.W. (1979) *Causes for world-wide changes in sea level*. Journ. Roy. Soc. London, vol. 136, p. 187–192.
- Doornhof, D. (1992) *Surface subsidence in The Netherlands: the Groningen gas field*. Geologie en Mijnbouw, vol. 71, p. 119–130.
- Fertl, W.H. (1987) *Log-derived evaluation of shaly clastic reservoirs*. Journ. Petr. Techn., p. 175–194.
- Geluk, M.C. (1995) *Stratigraphische Gliederung der Z2-(Staßfurt-)Salzfolge in den Niederlanden: Beschreibung und Anwendung bei der Interpretation von halokinetisch gestörten Sequenzen*, Z. dt. geol. Ges. 146, p. 1–8.
- Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (1984) *Nordwestdeutsches Oberkarbon (Teil 1)*. Fortschr. Geol. Rheinland und Westf., Band 32, Krefeld, 399pp.
- Glennie, K.W. (1983) *Lower Permian Rotliegend desert sedimentation in the North Sea area*. In: Developments in Sedimentology (Brookfield & Ahlbrandt, eds.), Elsevier, Amsterdam, vol. 38, p. 521–541.
- Glennie, K.W. (1986) *Early Permian - Rotliegend*. In: Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea (Glennie K.W., ed.), Blackwell Scientific Publ., Oxford, Second edition, p. 25–48.
- Glennie, K.W. & Buller, A.T. (1983) *The Permian Weissliegend of NW Europe: the partial deformation of aeolian dune sands caused by the Zechstein transgression*. Sedimentary Geology, vol. 35, p. 43–81.
- Guion, P.D. & Fielding, C.R. (1988) *Westphalian A and B sedimentation in the Pennine Basin*. In: Sedimentation in a synorogenic basin complex - the Upper Carboniferous of Northwest Europe (Besly, B.M. & Kelling, G., eds.). Blackie, Glasgow, p. 153–177.
- Haanstra, U. (1963) *A review of Mesozoic geological history of The Netherlands*. Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnb. Gen., vol. 21(2), p. 35–55.
- Hancock, J.M. (1984) *Cretaceous*. In: Petroleum Geology of the North Sea (Glennie, K.W., ed.), Blackwell Scientific Publ., Oxford, p. 133–149.
- Hancock, J.M. & Scholle, P.A. (1975) *Chalk of the North Sea*. In: Petroleum and the continental shelf of North-West Europe (Woodland A.W., ed.). Geology Appli. Sci. Publ. Inst. of Petroleum, London, p. 413–427.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. & Vail, P.R. (1987) *Chronology of fluctuating sealevels since the Triassic*. Science 235, p. 1156–1167.

- Harland, W.B., Armstrong, R.L., Cox, A.V., Craig, L.E., Smith, A.G. & Smith, D.G. (1990) *A geologic time table 1989*. Cambridge University Press, Cambridge, 263pp.
- Harsveldt H.M. (1980) *Salt resources in the Netherlands*. Geologica Ultraiectina, Spec. Publ. no.1, p. 29–52.
- Herngreen, G.F.W., Smit, R. & Wong, Th.E. (1991) *Stratigraphy and Tectonics of the Vlieland Basin, The Netherlands*. In: Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons (Spencer, A.M., ed.), Special publication EAPG no. 1, Oxford University Press, Oxford, p. 175–192.
- Hedemann, H.A., Schuster, A., Stancu-Kristoff, G. & Lösch, J. (1984) *Die Verbreitung der Kohlenflöze des Oberkarbons in Nordwestdeutschland und ihre stratigraphische Einstufung*. Fortschr. Geol. Rheinland und Westf., 32, p. 39–88.
- Heybroek, P. (1974) *Explanation to tectonic maps of The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 53, p. 43–50.
- Jaritz, W. (1973) *Zur entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands*. Geol. Jb, A10, 77pp.
- Jaritz, W. (1987) *The origin and development of salt structures in north-west Germany*. In: Dynamical Geology of Salt and Related structures. (Lerche, I. & O'Brien J.J eds) Academic Press Orlando p. 480–493.
- Jaritz, W. (1992) *Fortschritte und offene Fragen zur entstehung der Salzstrukturen NW-Deutschlands*. In: Veröffentlichungen: Salz in Niedersachsen. Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften, Heft 8, p. 16–24.
- Jenyon, M.K. (1986) *Salt Tectonics*. Elsevier Appl. Science Publ. London. 191pp.
- Knaap, W.A. & Coenen, M.J. (1987) *Exploration for oil and natural gas*. In: Seventy-five years of geology and mining in The Netherlands (1912–1987). (Visser, W.A., Zonneveld, J.I.S. & Van Loon, A.J. eds.) Royal Geological and Mining Society of The Netherlands (K.N.G.M.G.), The Hague.
- Koyi, H. (1988) *Experimental modelling of the role of gravity and lateral shortening in Zagros Mountain Belt*. AAPG Bull. vol. 72, p. 1381–1394.
- Koyi, H. (1991) *Gravity overturns, extension and basement fault activation*. Journ. Petrol. Geol., vol. 14, p. 117–142.
- Koyi, H., Jenyon M.K. & Petersen K. (1993) *The effect of basement faulting on diapirism*. Journ. Petrol. Geol., vol. 16, p. 285–312.
- Kulick, J. & Paul, J. (1987) *Zur Stratigraphie und Nomenklatur des Zechsteins, Glossar*. Int. Symp. Zechstein 1987, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, p. 25–34.
- Letsch, W.J. & Sissingh, W. (1983) *Tertiary stratigraphy of The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 62, p. 305–318.
- Lorentz, V. & Nicholls, I.A. (1976) *Plate and intraplate processes of Hercynian Europe during the late Paleozoic*. Tectonophysics, 107, p. 25–56. McKenzie, D.P. (1978) *Some remarks on the development of sedimentary basins*. Earth Planet. Sci. Lett. 40, p. 25–32.
- Ministerie van Economische Zaken (1995) *Olie en gas in Nederland, opsporing en winning 1994*. De grafische Haarlem, 98pp.
- Nagtegaal, P.J.C. (1979) *Relationship of facies and reservoir quality in Rotliegendes desert sandstones, Southern North Sea region*. Journal of Petr. Geol., vol. 2, p. 145–158.
- NAM (1995) *Bodemdaling door aardgaswinning. Statusrapport 1995 en prognose tot het jaar 2050*. NAM rapport 27600.
- NLfb (1989) *Darstellung und Benennung der Salzstrukturen in der deutschen Nordsee*. Erdöl, Erdgas, Kohle. 105, p. 10–11.
- Perrot, J. & Van der Poel, A.B. (1987) *Zuidwal - a Neocomian gas field*. In: Petroleum of Northwest Europe (Brooks, J. & Glennie, K.W. eds.), Graham & Trotman, London, vol.1, p. 325–335.
- Peryt, T.M. (1975) *Significance of stromatolites for environmental interpretations of the Buntsandstein (Lower Triassic) Rocks*. Geol. Rundschau 64, p. 143–158.
- Pitman, W.C. (1978) *Relationship between eustasy and stratigraphic sequences on passive margins*. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 89, p. 1389–1403.
- Ramsbottom, W.H.C. (1979) *Rates of transgression and regression in the Carboniferous of NW Europe*. J. Geol. Soc. London, 136, p. 147–154.
- Read, W.A. & Dean, J.M. (1973) *A statistical relationship between net subsidence and number of cycles in Upper*

- Carboniferous paralic facies successions in Great Britain. C. R. VII Congr. Int. Strat. Géol. Carb., Krefeld, 1971, 3, p. 153–159.
- Read, H.H. & Watson, J. (1975) *Introduction to Geology*. Earth History, part. II; Later Stages of Earth History, vol. 2. The Macmillan Press, London, 371 pp.
- Remmelts, G. (in druk) *Fault-related salt tectonics in the southern North Sea, The Netherlands*. In: Salt tectonics in a global perspective. AAPG Mem. 65.
- Rijks Geologische Dienst (1984) *Geologische en hydrologische inventarisatie van Tertiaire en Onder-Kwartaire afzettingen in Noord-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water*. Rapport nr. 84KAR08EX.
- Rijks Geologische Dienst (1991a) *Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij Blad I: Vlieland-Terschelling*. RGD, Haarlem, 77pp.
- Rijks Geologische Dienst (1991b) *Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij Blad II: Ameland-Leeuwarden*. RGD, Haarlem, 87 pp.
- Rijks Geologische Dienst (1993a) *Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad IV: Den Helder - Purmerend*. RGD, Haarlem, 128 pp.
- Rijks Geologische Dienst (1993b) *Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad V: Sneek - Zwolle*. RGD, Haarlem, 126 pp.
- Röhlhng, H.G. (1991) *A lithostratigraphic subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German lowlands and the German sector of the North Sea, based on gamma-ray and sonic logs*. Geol. Jb. A.119, p. 3–24.
- Schröder, B. (1982) *Entwicklung des Sedimentbeckens und Stratigraphie der klassischen germanischen Trias*. Geologisches Rundschau, Band 71, p. 783–794.
- Slater, J.G. & Christie, P.A.F. (1980) *Continental Stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence in the Central North Sea Basin*. J. Geophys. Res., vol. 85, p. 3711–3739.
- Selter, V. (1990) *Sedimentologie und Klimaentwicklung im Westphal C/D und Stephan des nordwestdeutschen Oberkarbon-Beckens*. DGMK-Bericht, 384-4, Deutsche wiss. Gesellsch. Erdöl, Erdgas und Kohle, Hamburg, 311 pp.
- Stäuble, A.J. & Milius, G. (1970) *Geology of the Groningen gasfield, Netherlands*. In: Geology of giant petroleum fields (Halbouty, M.T. ed.). AAPG Mem. 14, p. 359–369.
- Stille, H. (1924) *Grundfragen der vergleichenden Tektonik*. Bornträger, Berlin, 443 pp.
- Tantow, M.S. (1993) *Stratigraphie und seismisches Erscheinungsbild des Oberkarbons (Westfal, Stefan), Emsland*. Berliner Geowiss. Abh., A, 148, 66 pp.
- Taylor, J.C.M. (1986) *Late Permian - Zechstein*. In: Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea (Glennie, K.W., ed.), Blackwell Scientific Publ., Oxford, Second edition, p. 86–111.
- Teichmüller M., Teichmüller R. & Bartenstein H. (1985) *Inkohlung und erdgas - eine neue Inkohlungskarte der Karbon-Oberfläche in Nordwestdeutschland*. Fortschr. Geol. Rheinland u. Westf., 32: 11–34.
- 't Hart, B.B. (1969) *Die Oberjura- und Unterkreide Sedimentation in den nordlichen und östlichen Niederlanden*. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, vol.22, p. 253–261.
- Trusheim, F. (1957) *Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands*. Z. dt. geol. Ges. 109, p. 111–151.
- Trusheim, F. (1960) *Mechanism of salt migration*. AAPG Bull., vol. 44, no. 9, p. 1519–1540.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M. Jr. & Todd, R.G. (1977) *Eustatic model for the North Sea during the Mesozoic*. N.P.F. Mesozoic Northern North Sea Symposium, Oslo, p. 1–12.
- Van Adrichem Boogaert, H.A. & Kouwe, W.F.P. (1993–1995) *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGPA*. Mededelingen Rijks Geol. Dienst, 50.
- Van der Zwan, C.J., van de Laar, J.G.M., Pagnier, H.J.M. & van Amerom, H.W.J. (1993) *Palynological, ecological and climatological synthesis of the upper Carboniferous of the well De Lutte-6 (East Netherlands)*. C. R. XII Congr. Int. Strat. Géol. Carb., Buenos Aires, 1991, 1, p. 439–457.
- Van Rossum, B. (1978) *Geology and appraisal development of the Groningen Field*. European Petroleum and Gas Conference, RAI Amsterdam May 23–25.

Van Wijhe, D.H. (1987) *Structural evolution of inverted basins in the Dutch Offshore*. Tectonophysics, 137, p. 171–219.

Van Wijhe, D.H., Lutz, M. & Kaasschieter, J.P.H. (1980) *The Rotliegend in The Netherlands and its gas accumulations*. Geologie en Mijnbouw, vol.59, p. 3–24.

Van Wijhe, D.H. & Bless, M.J.M. (1974) *The Westphalian of The Netherlands with special reference to miospore assemblages*. Geologie en Mijnbouw, vol.53, p. 295–328.

Literatuur

Veld, H. (1995) *Organic Petrology of the Westphalian of The Netherlands. Deviations in vitrinite reflectance trends*. 190pp. Thesis. Rijks Universiteit Utrecht.

Veld, H., Fermont, W.J.J. & Jegers, L.F. (1993) *Organic petrological characterization of Westphalian coals from The Netherlands: Correlation between Tmax, vitrinite reflectance and hydrogen index*. Organic geochemistry, 20, 6, p. 659–675.

VUA, 1992, *Intraplaattektiek, bekkenmodellering en zoutdiapirisme*. Inhoudelijke deelstudie: Modellering Deel 1 en 2: Rapportage OPLA project augustus 1992, OPLA92-xx. Sectie Structurele Geologie/Tektoniek, Vrije Universiteit Amsterdam.

Zagwijn, W.H. (1990) *The Netherlands during the Tertiary and Quaternary: a case history of Coastal Lowlands evolution*. Geologie en Mijnbouw, vol.68, p. 107–121.

Zagwijn, W.H., & Van Staalduinen, C.J. (eds.) (1975) *Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland*. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Ziegler, P.A. (1978) *North-Western Europe: tectonics and basin development*. Geologie en Mijnbouw, vol. 57, p. 589–626.

Ziegler, P.A. (1982) *Geological Atlas of Western and Central Europe*. Shell International Petroleum Maatschappij B.V., distributed by Elsevier, Amsterdam, 130pp.

Ziegler, P.A. (1988) *Evolution of the Arctic - North Atlantic and the Western Tethys*. AAPG Mem. 43, 198pp.

Ziegler, P.A. (1989) *Evolution of Laurussia - A study in Late Paleozoic Tectonics*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 102pp.

Ziegler, P.A. (1990) *Geological Atlas of Western and Central Europe; second and completely revised edition*. Shell International Petroleum Maatschappij BV, 239pp.

RGD, 1972, Van Amerom, H.W.J. *Palynologisch onderzoek van het Carboon van de boring Tjuchem-2*. Rapport no. GB1287, GB1210.

RGD, 1992a, Van de Laar, J.G.M. *Palynologisch onderzoek van het Karboon van de boringen Bierum-1, Zuidwending-1, Delfzijl-1, Midwolda-1, Bedum-1, Oude Pekela-1, Slochteren-4, Midlaren-1, Goldhoorn-1, Heiligerlee-1, Roode Til-1, Tusschenklappen-1, 't Zand-12, Zuidbroek-1 en Uiterburen-2*. Rapport no. 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405.

RGD, 1992b, Herngreen, W. *Biostratigrafisch (palynologisch) onderzoek van de boring Ten Post-1*. Rapport no. 2258.

RGD, 1992c, Schuurman, H.A. & Lissenberg, T. *Biostratigrafische interpretatie van het Onder-Krijt van de boringen de Hond-1, Bierum-1, Roden-101, Haren-1 en Oudeweg-1*. Rapport Micropal Mesozoïcum no.550a, 551, 552a, 553, 554.

RGD, 1992d, Schuurman, H.A. & Lissenberg, T. *Biostratigrafisch onderzoek aan het Boven-Krijt van de boringen Winsum-1, de Hond-1, Roden-101 en Stedum-01*. Rapport Micropal Mesozoïcum no. 549, 550, 552, 556.

RGD, 1993, Ramaekers, J.J.F. & Neele, N.G. *Resultaten petrofysische evaluatie van de Boven-Rotliegend Groep op Kaartblad III*. Rapport no. 93KAR10.

RGD, 1994, Fermont, W.J.J., David, P., Jegers, L. & Milder, H. *Een modelstudie naar de timomg van gasgeneratie in het Groningen gasveld (Kaartblad III)*. Rapport no. GB 2427.

¹ Interne rapporten van de Rijks Geologische Dienst zijn niet algemeen beschikbaar voor derden.

Geologische Kaarten

De kaarten zijn samengesteld door

E.J.Th. Duin

S. Lauffer-Brouw

Technische assistentie

C.M. Elmers-Kathmann

C.C. de Ruyter

Vormgeving

R.M. Metten

Kartografie

Europees Cartografisch Instituut, Zoetermeer

Druk

Haagse Drukkerij/Lakerveld, Den Haag

Toelichting

De toelichting is geschreven door

S. Lauffer-Brouw

G. Remmelts

Assistentie

R.H.B. Rijkers

N. Witmans

M.C. Geluk

Figuren

R.R. van der Kraan

Speciale studies:

Petrofysica

J.J.F. Ramaekers

N.G. Neele

Organische geochemie

W.J.J. Fermont

P. Davids

L.F. Jegers

H. Milder

Biostratigrafie

G.F.W. Herngreen

D.K. Munsterman

S.J. Kerstholt-Boegehold

J.G.M. van de Laar

L.J. Witte

T. Lissenberg

H.A. Schuurman

Vormgeving

BRS Premsela Vonk, Amsterdam

J.A.M. Bruinenberg

Druk

Sdu Grafisch Bedrijf, Den Haag

Algehele leiding

Th.H.M. van Doorn

Copyright © 1995

Rijks Geologische Dienst, Haarlem

Behoudens uitzondering door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming van de houder van de rechthebbende(n) op het auteursrecht niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins. Deze restrictie geldt eveneens voor de gehele of gedeeltelijke bewerking van kaarten en profielen. De uitgever is met uitsluiting van ieder ander gerechtigd de door derden verschuldigde vergoedingen van kopiëren, als bedoeld in artikel 17 lid 2, Auteurswet en in het K.B. van 20 juni 1974 (Stb. 351) ex artikel 16b Auteurswet 1912, te innen en/of daartoe in en buiten rechte op te treden.

ISBN 90-72869-30-3

*Rijks Geologische Dienst, 1995 – Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland,
Toelichting bij kaartblad III: Rottumeroog – Groningen, RGD, Haarlem.*

Deze publikatie is eveneens verkrijgbaar in een Engelstalige versie (ISBN 90-72869-31-1).
This publication is also available in English (ISBN 90-72869-31-1).

