

Rijks Geologische Dienst **RGD**

Toelichting bij kaartblad I Vlieland-Terschelling

Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland

Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland

Toelichting bij blad I Vlieland-Terschelling

Inhoud

Voorwoord

1	Inleiding	6
1.1	Begrenzing van het studiegebied	6
1.2	Gegevensbestand	6
1.3	Opzet van het onderzoek	7
1.4	Kaarten en profielen	9
1.5	Toelichting	10
2	Limburg Groep	12
2.1	Stratigrafie	12
2.1.1	Coal Measures	13
2.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	15
3	Boven-Rotliegend Groep	16
3.1	Stratigrafie	16
3.1.1	Slochteren Zandsteen Formatie	17
3.1.2	Silverpit Kleisteen Formatie	19
3.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	21
3.3	Petrofysische evaluatie	22
4	Zechstein Groep	24
4.1	Stratigrafie	24
4.1.1	Zechstein 1 Formatie	25
4.1.2	Zechstein 2 Formatie	26
4.1.3	Zechstein 3 Formatie	28
4.1.4	Zechstein 4 Formatie	29
4.1.5	Boven-Zechstein	29
4.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	30
5	Onder-Germaanse Trias Groep	33
5.1	Stratigrafie	33
5.1.1	Onder-Bontzandsteen Formatie	33
5.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	34
6	'Boven-Jura' afzettingen	35
6.1	Stratigrafie	35
6.1.1	Zuidwal Vulkaniet Formatie	36
6.1.2	Central Graben Groep	37
6.1.2.1	Delfland Formatie	37
6.1.3	Scruff Groep	39
6.1.3.1	Kimmeridge Klei Formatie	39
6.1.3.2	Scruff Groenzand Formatie	40
6.2	Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	41
6.3	Petrofysische evaluatie	41
7	Rijnland Groep	42
7.1	Stratigrafie	42
7.1.1	Vlieland Formatie	42

	7.1.2 Holland Formatie	44
	7.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	46
	7.3 Petrofysische evaluatie	47
8	Krijtkalk Groep	49
	8.1 Stratigrafie	49
	8.1.1 Texel Krijtkalk Formatie	50
	8.1.2 Ommelanden Krijtkalk Formatie	50
	8.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	50
9	Noordzee Supergroep	52
	9.1 Stratigrafie	52
	9.1.1 Onder-Noordzee Groep	52
	9.1.2 Midden-Noordzee Groep	53
	9.1.3 Boven-Noordzee Groep	53
	9.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie	54
10	Geologische geschiedenis	55
11	Appendices	66
	Appendix A: Overzicht gebruikte seismische gegevens	66
	Appendix B: Overzicht gebruikte boringen	67
	Appendix C: Reservoirsommities Boven-Rotliegend Groep	68
	Appendix D: Show, status en testgegevens Boven-Rotliegend Groep	70
	Appendix E: Reservoirsommities bovenste Delfland Formatie	71
	Appendix F: Reservoirsommities Vlieland Zandsteen	72
	Appendix G: Show, status en testgegevens Vlieland Zandsteen	73
12	Referenties	74
	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-Germaanse Trias Groep	
	Kaart 7: Diepte van de Basis van de 'Boven-Jura' afzettingen	
	Kaart 8: Dikte van de 'Boven-Jura' afzettingen	
	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: Afgedekte geologische kaart onder de Basis van de Rijnland Groep	
	Kaart 15: Afgedekte geologische kaart onder de 'Boven-Jura' afzettingen	
	Kaart 16: Structurele profielen	

Eén van de hoofdtaken van de Rijks Geologische Dienst is het verzamelen van kennis omtrent de geologie van Nederland. Rapportage hiervan vindt ondermeer plaats in de vorm van kaarten en toelichtingen op deze kaarten. Tot nu heeft de Rijks Geologische Dienst zich beperkt tot het uitbrengen van kaarten met toelichting van de ondiepe geologie van Nederland en de Noordzee. Voor wat betreft de diepe geologie is de situatie anders. De gegevens worden bijna uitsluitend door de oliemaatschappijen verzameld en in het kader van mijnwettelijke verplichtingen aan de Rijks Geologische Dienst ter beschikking gesteld. Voor zover deze gegevens worden verzameld op het Continentale Plat van Nederland, worden deze gegevens na een periode van 10 jaar vrijgegeven. Het verkrijgen van inzicht in de diepe geologie onder de Noordzee is daarom voor een ieder mogelijk. Belangstellenden kunnen hun eigen interpretaties maken. De bestaande mijnwetgeving, die voor het vaste land van toepassing is, laat deze vrijgave niet toe. Afspraken met de maatschappijen omtrent het gebruik van deze gegevens hebben het mogelijk gemaakt dat de Rijks Geologische Dienst deze gegevens bewerkt en de resultaten daarvan kan publiceren, mits de gegevens ouder zijn dan 10 jaar; een uitzondering geldt voor gegevens afkomstig uit concessie gebieden, waar een beperking geldt van 5 jaar. Deze afspraak maakt het mogelijk, dat door de RGD toch een bredere bekendheid kan worden gegeven aan de geologische opbouw van de diepe ondergrond van Nederland.

Het kaartblad Vlieland-Terschelling van de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland is het eerste kaartblad dat wordt uitgebracht in het kader van een systematische kartering van de diepe ondergrond van Nederland gebaseerd op deze gegevens. Hiertoe is Nederland verdeeld in 15 kaartbladen, schaal 1:250.000 (zie kaart 1 met daarop in de rechterbenedenhoek de kaartblad indeling). In het jaarverslag van de Rijks Geologische Dienst wordt ieder jaar een overzicht gegeven van de stand van zaken van deze kartering. Ieder kaartblad bestaat uit een aantal dieptekaarten en diktekaarten van de belangrijkste lithostratigrafisch gedefinieerde geologische eenheden, enkele profielen en afgedekte geologische kaarten en gaat vergezeld van een toelichting.

De Rijks Geologische Dienst spreekt de verwachting uit dat deze serie kaarten een bijdrage kan leveren 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, lagere overheden, overheids- en semi-overheidsinstellingen en diverse andere maatschappelijke groeperingen. Immers, de laatste jaren worden deze 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 de afvalbergingsproblematiek, energieopslag en aardwarmte als alternatieve bron van energie. De toelichting bij deze kaarten is niet alleen gericht op de bij bedrijfsleven of overheid werkende aardwetenschapper, maar is evenzeer van belang voor onderwijs, wetenschap en de geïnteresseerde amateur geoloog.

De kartering van de Diepe Ondergrond van Nederland startte in 1985 onder de leiding van H.M. van Montfrans. Vanaf 1986 tot en met 1990 werd het werk uitgevoerd onder supervisie van A. Lokhorst. Sinds 1991 berust de leiding bij Th.E. Wong. De feitelijke kartering van het kaartblad Vlieland-Terschelling startte in 1986. Naast de in het colofon genoemd medewerkers, die inhoudelijk hebben bijgedragen, zijn bij het tot stand komen van dit kaartblad veel medewerkers van de Rijks Geologische Dienst betrokken geweest, waarbij in het bijzonder de bijdragen van J. Breeuwer, C.M. Elmers-Kathman, J. Klijn, N. Parker-Witmans, C.C. de Ruyter en R.A. Wermuth niet onvermeld mogen blijven. Hun aller inzet stel ik op hoge prijs. De relevante en opbouwende kritiek van de leescommissie heeft veel bijgedragen aan de kwaliteit van de toelichting. Speciale

dank is verschuldigd aan Chevron, Elf Petroland, NAM, Mobil, Phillips, Placid, Shell en Western Geophysical. Gegevens van al deze maatschappijen zijn in deze kartering gebruikt.

C. Staudt, *Direkteur*

1 Inleiding

1.1 Begrenzing van het studiegebied

Het kaartblad Vlieland-Terschelling is het eerste kaartblad dat wordt uitgebracht in het kader van de systematische kartering van de diepe ondergrond van Nederland. Het kaartbladgebied is gelegen in het uiterste noordwestelijke deel van Nederland en strekt zich uit tot aan de grens van de territoriale wateren (zie figuur 1.1).

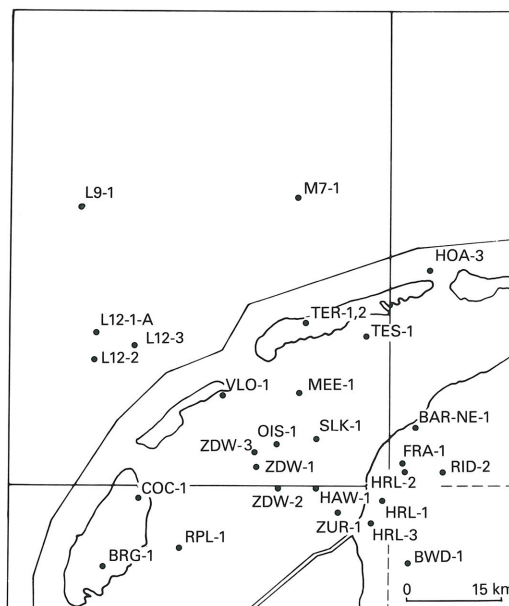
1.2 Gegevensbestand

De gegevens, waarop de kennis van de diepe ondergrond is gebaseerd, zijn vooral afkomstig van de oliemaatschappijen. De ontdekking van het Groningen gasveld in 1959 was mede aanleiding om ook binnen het kaartbladgebied te exploreren. Verschillende maatschappijen zijn sindsdien in de regio Friesland, Noord-Holland en de Waddenzee actief geweest. Om mogelijke koolwaterstofvoorkomens te lokaliseren werden vele kilometers seismische lijnen geschoten en verscheidene boringen gezet.

Het exploratiedoel was in eerste instantie de Permische gasvoerende eenheid in het Groningen veld, de Slochteren Zandsteen. In 1964 echter werd door Petroland in de directe omgeving van het kaartbladgebied gas gevonden in de Vlieland Zandsteen (Harlingen-1), gevolgd door een gasvondst in de Ommelanden Krijt kalk (Harlingen-2, 1965). Door deze gasvondsten richtte de exploratie zich sindsdien op verscheidene doelen.

Na het van kracht worden van de Wet Opsporing Delfstoffen in 1967 werden aan Petroland, de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) en aan de combinatie NAM/Mobil Producing Netherlands Inc. (MPNI) boorvergunningen verleend, die geheel of ten dele binnen het gekarteerde gebied vallen. Door Petroland werd in 1970 binnen de grenzen van het kaartbladgebied gas gevonden in de Vlieland Zandsteen (Zuidwal-1). De grote kwetsbaarheid van het Waddenzeemilieu leidde echter tot het tijdelijk stopzetten van de exploratie-activiteiten.

Figuur 1.1 Ligging van het kaartblad Vlieland-Terschelling en lokatiekaart van de binnen het kaartbladgebied en directe omgeving uitgevoerde boringen.



Dit heeft voor deze studie tot gevolg dat in dit gebied slechts een beperkt en oud gegevensbestand ter beschikking staat. Eerst in 1984 werd aan Petroland een concessie verleend en sinds 1988 wordt aardgas uit het Zuidwal gasveld geproduceerd. Sindsdien zijn er in de regio deels binnen de grenzen van het kaartbladgebied vallende concessies en boorvergunningen verleend aan de NAM, NAM/MPNI en Placid (zie figuur 1.2).

De kartering van de diepe ondergrond van Nederland is voor een belangrijk deel gebaseerd op de interpretatie van de gegevens die door bovengenoemde maatschappijen zijn verzameld. Het hoofdstuk over de geologische geschiedenis van het kaartbladgebied is tevens gebaseerd op gegevens uit de literatuur. Het regionaal geologische kader is ontleend aan publikaties zoals Ziegler (1982), Glennie (1984) en Heybroek (1974).

1.3 Opzet van het onderzoek

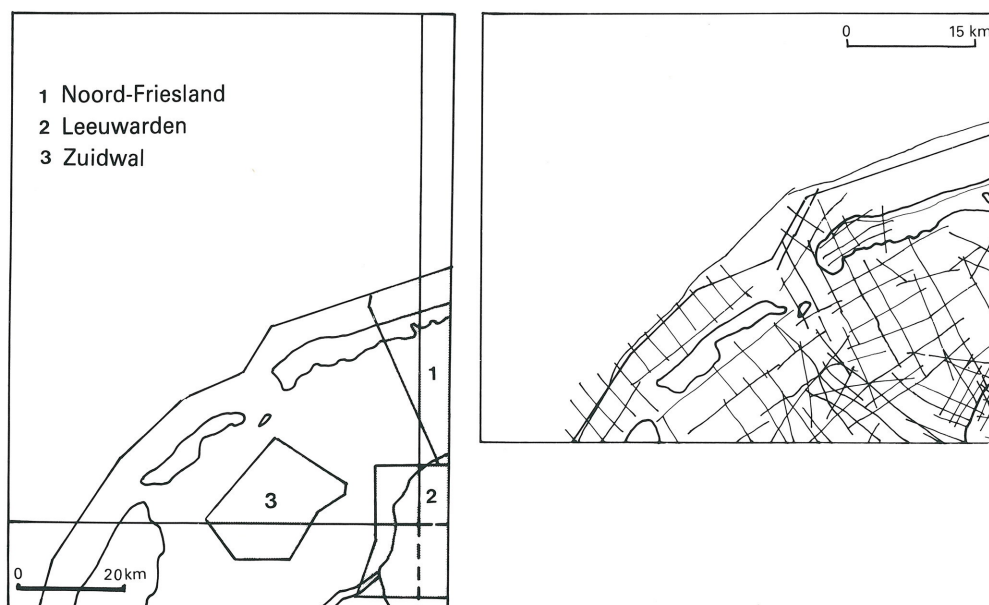
Seismische kartering

Het onderzoek richtte zich op de systematische, structureel geologische kartering op basis van seismische gegevens. Bij deze regionale kartering is gekozen voor een seismisch lijnennet van ongeveer 4 bij 4 kilometer. In een aantal gebieden binnen het kaartblad kon deze lijnendichtheid echter niet worden gerealiseerd. In deze gebieden werd acquisitie van seismische lijnen bemoeilijkt door de gesteldheid van het terrein of verhinderd door reeds genoemde exploratiebeperkingen. Een overzicht van de gebruikte seismische lijnen is weergegeven in figuur 1.3. Er werd gebruik gemaakt van niet-gemigreerde seismische lijnen uit de periode van 1965 tot 1980 (zie appendix A).

De vervolgde reflectoren vormen de grensvlakken tussen de grote lithostratigrafische eenheden (groepen). Voor de calibratie van de seismische gegevens aan de boorgatgegevens werd gebruik gemaakt van de akoestische logs en de putschietgegevens. De verticale tijd-diepte omzetting

Figuur 1.2 Verleende concessiegebieden voor de winning van bitumina binnen het kaartbladgebied en de nabije omgeving.

Figuur 1.3 Lokatiekaart van het gebruikte seismische lijnennet.



van de seismische interpretaties is per laag uitgevoerd (de 'layer-cake' methode). Hiervoor is per laag een lineair verband aangenomen tussen de snelheid en de diepte van de laag ($V_z = V_0 + kz$). Een uitzondering hierop is de Zechstein Groep. Door de specifieke stratigrafische opbouw van deze groep is voor een hyperbolisch verband tussen de intervalsnelheid en het tijdsinterval gekozen ($V_{int} = a + [d/(\Delta t - b)]^c$). Om een consistente aansluiting van dieptekaarten van naast elkaar liggende kaartbladgebieden te krijgen, is een landelijke snelheidsverdeling gemaakt, die op alle kaartbladgebieden toegepast kan worden. De parameters van de landelijke snelheidsverdeling zijn bepaald uit de akoestische gegevens van 65 boringen. De boringen liggen verspreid over geheel Nederland. Bij het bepalen van de parameters is een maximale fout van 5% tussen de diepten van de boring en de seismische interpretaties toelaatbaar geacht. Tabel 1 geeft een overzicht van de parameters die voor de lineaire en hyperbolische snelheidsverdelingen gebruikt zijn.

Geologisch onderzoek

Het geologisch onderzoek richtte zich op de lithostratigrafische opbouw van de binnen het kaartbladgebied aanwezige gesteenten (zie figuur 1.4), en hun geologische geschiedenis tegen de achtergrond van de regionaal geologische ontwikkeling. Hierbij werd gebruik gemaakt van eerder genoemde seismische gegevens en boorgatmetingen, aangevuld met lithologisch en biostratigrafisch onderzoek aan gesteentemonsters. Een overzicht van de gebruikte boringen wordt in appendix B gegeven.

Binnen het gekarteerde deel van het kaartbladgebied waren slechts negen boringen voor het onderzoek beschikbaar. Daar in deze boringen niet voor iedere formatie een voor het kaartbladgebied representatieve sectie aanwezig is, werd voor de beschrijving van de lithologie ook gebruik gemaakt van boringen uit de directe omgeving. De lokaties van alle in de studie gebruikte boringen zijn weergegeven in figuur 1.1.

tabel 1 Toegepaste snelheidsverdelingen

gebaseerd op $V_z = V_0 + kz$				
<i>Eenheid</i>	<i>Vom/s</i>	<i>k</i>		
Noordzee Supergroep	1696	0.40		
Krijtkalk Groep	2092	1.08		
Holland Formatie	2020	0.63		
Vlieland Formatie	2051	0.41		
'Boven-Jura' afzettingen	1507	0.82		
Onder-Germaanse Trias Groep	2293	0.69		
Boven-Rotliegend Groep	3535	0.18		
gebaseerd op $V_{int} = a + [d/(\Delta t - b)]^c$				
<i>Eenheid</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Zechstein Groep	4410,	0.047	− 0.018	1

Δt = tijdsinterval Zechstein

b = asymptoot Δt (s)

a = asymptoot intervalsnelheid (m/s)

c, d = constanten

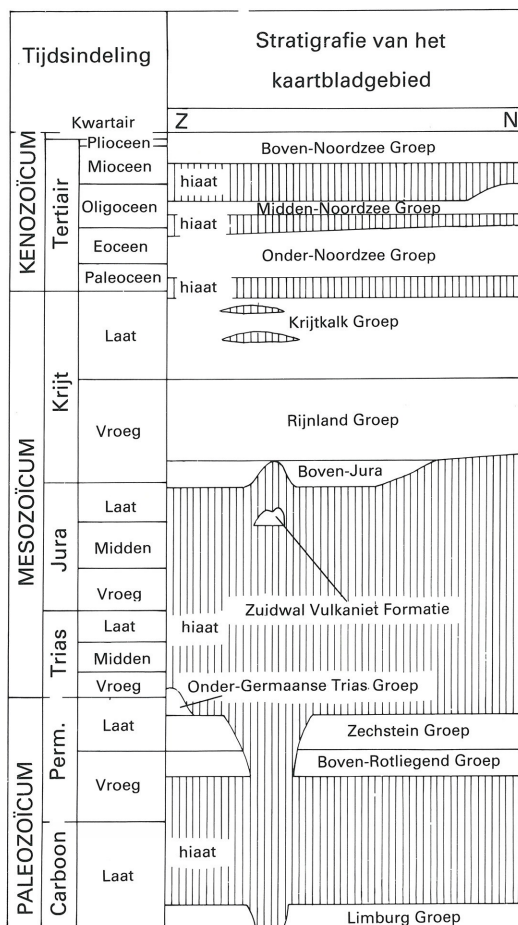
Petrofysisch onderzoek

Naast het geologisch onderzoek is ook aandacht besteed aan de eigenschappen van de reservoirgesteenten binnen het kaartbladgebied. Boorgatmetingen en kernanalyse-gegevens werden bewerkt voor het berekenen van porositeiten.

1.4 Kaarten en profielen

De resultaten van de seismische kartering zijn weergegeven op een reeks kaarten en twee profielen. Per groep zijn er diepte- en diktekaarten gemaakt (conform figuur 1.4). Van de twee belangrijke discordanties, aan de basis van de Rijnland Groep en de 'Boven-Jura' afzettingen, zijn afgedekte kaarten gemaakt. Dieptekaarten zijn gemaakt van de onderkant van de Boven-Rotliegend Groep, de Zechstein Groep, de Onder-Germaanse Trias Groep, de 'Boven-Jura', de Rijnland Groep, de Krijtkalk Groep en de onderkant van de Noordzee Supergroep. Bovendien is er ook van de bovenkant van de Zechstein Groep een dieptekaart gemaakt. De dieptekaarten zijn gebaseerd op de seismische gegevens. Doordat, zoals eerder vermeld, de conversie van tijd naar diepte met een landelijk bepaalde snelheidsverdeling is uitgevoerd, kunnen er lokaal afwijkingen optreden met de dieptewaarden zoals die in de boringen zijn bepaald. De dieptekaarten zijn voor deze afwijkingen niet gecorrigeerd.

Figuur 1.4 Stratigrafisch diagram met de binnen het kaartbladgebied aanwezige afzettingen.



De voor de kartering van het kaartbladgebied gebruikte seismische lijnen zijn in het algemeen van matige kwaliteit. De onderkant van de Boven-Rotliegend Groep kon dan ook niet uit de seismiek bepaald worden. De dieptekaart van deze groep is daarom gebaseerd op de dieptekaart van de onderkant van de Zechstein Groep, waarbij een uit boorgegevens gemaakte regionale diktekaart van de Boven-Rotliegend Groep is opgeteld.

Er zijn tevens diktekaarten gemaakt van alle bovengenoemde stratigrafische eenheden, met uitzondering van de Noordzee Supergroep. Hier volstaat de dieptekaart als diktekaart. De diktekaart van de Boven-Rotliegend Groep is om eerder genoemde reden niet op grond van de seismische gegevens maar op putgegevens gebaseerd en als figuur 3.2 in de tekst opgenomen.

De kwaliteit van de kaarten is afhankelijk van de kwaliteit en de dichtheid van de beschikbare gegevens. In het gebied van de Waddenzee en op Vlieland is de kartering op dit punt nadelig beïnvloed. De seismische bedekking is vrij gering, en bovendien stammen de aanwezige seismische lijnen uit de zestiger jaren.

De afgedekte geologische kaarten van de onderkant van de Rijnland Groep en de onderkant van de 'Boven-Jura' afzettingen laten de stratigrafische eenheden zien die onder de discordanties voorkomen en geven zodoende een indruk van de mate van erosie. Een afgedekte geologische kaart beneden de onderkant van de Noordzee Supergroep wordt niet gepresenteerd, omdat binnen het gekarteerde gebied onder de Noordzee Supergroep uitsluitend de Krijtkalk Groep voorkomt.

Ten slotte worden twee profielen op een afzonderlijke kaart weergegeven. Deze profielen zijn zodanig gekozen dat zij aansluiten op de profielen van de omliggende kaartbladgebieden en hebben respectievelijk een NW-ZO en een ZW-NO oriëntatie.

1.5 Toelichting

De toelichting beoogt aan de hand van de verschillende kaarten een beeld te geven van de geologie van het kaartbladgebied. De tekst is in twee delen opgedeeld. Eerst worden groepsgewijs de binnen het kaartbladgebied aanwezige gesteenten beschreven. Vervolgens wordt in het laatste hoofdstuk een overzicht gegeven van de geologische geschiedenis van het studiegebied tegen de achtergrond van de regionale geologie.

In de hoofdstukken 2 tot en met 9 worden per groep, van oud naar jong, de lithostratigrafische opbouw en ontwikkeling beschreven. De nadruk ligt op de verbreiding en de variatie van de gesteente-eenheden binnen het gekarteerde gebied. Deze beschrijving wordt afgesloten met een paragraaf gewijd aan het sedimentaire milieu en de paleogeografie tijdens de afzetting van de groep. Tenslotte wordt aan twee economisch belangrijke reservoirgesteenten extra aandacht besteed. Een en ander wordt geïllustreerd aan de hand van log correlaties. In een aantal gevallen zijn op formatieniveau of op laagpakketniveau eenheden in kaart gebracht die als tekstfiguur in de toelichting zijn opgenomen.

De 'Boven-Jura' bestaat uit de Scruff Groep en de Central Graben Groep. De groepen zijn deels elkaars laterale equivalent waardoor een scherpe begrenzing onmogelijk is. Omdat de verbreiding en sedimentaire milieus van beide groepen eveneens sterk aan elkaar zijn gerelateerd worden zij in de toelichting onder de noemer 'Boven Jura' behandeld.

Kenozoïsche sedimenten worden niet op groepsniveau, maar in één geheel als de Noordzee Supergroep behandeld. Bovendien beperkt de beschrijving zich tot de Tertiare sedimenten en zij men voor wat de Kwartaire afzettingen betreft verwezen naar de 'Toelichting van de geologische kaart van Nederland 1:50.000' van de Rijks Geologische Dienst.

In hoofdstuk 10 wordt de structureel-geologische opbouw en ontwikkeling van het kaartbladgebied beschreven. Belangrijke structurele eenheden binnen het studiegebied zijn het Texel-IJsselmeer Hoog en het Vlieland Bekken met het daarin gelegen Zuidwal Hoog.

De dieptekaarten van de Boven-Rotliegend Groep en de Zechstein Groep (kaarten 1 en 2) geven een indicatie van de structurele trend van het gebied. Deze is noordwest-zuidoost gericht en gesuperponeerd op een meer oost-west gerichte trend uit het Carboon.

Belangrijk voor de structurele ontwikkeling van het gebied is de aanwezigheid van een dikke sequentie steenzout in de Zechstein Groep. Door het relatief plastische gedrag van dit gesteente heeft het als ontkoppelingszone gefungeerd. Dit heeft geresulteerd in zoutruggen en disharmonische structuren boven en onder de Zechstein Groep. Deze fenomenen komen duidelijk naar voren op de diktekaart van de Zechstein Groep en bij een vergelijking van de dieptekaarten van de boven- en onderkant van deze Groep (kaarten 2, 3 en 4). De meeste breuken die de onderkant van de groep doorbreken worden door het plastische gedrag van het zout geacommodeerd en komen aan de bovenkant niet voor. Die breuken die wel aan de bovenzijde voorkomen zijn bijna allemaal gerelateerd aan inzakstructuren boven zoutruggen.

Belangrijke fasen van opheffing en daarmee samenhangende erosie traden op tijdens het Vroeg-Perm (Saalische fase; fig. 2.4), gedurende de Jura (Kimmerische fasen; kaarten 14 en 15) en tijdens het Laat Krijt (Subhercynische en Laramische fasen). Bij deze laatste fase werd het Vlieland Bekken opgeheven (geïnverteerd). Dit is duidelijk te zien op de profielen (kaart 16) en blijkt uit een vergelijking van de dikte van de Rijnland Groep en de Krijtkalk Groep (kaarten 10 en 12).

Een speciaal geologisch fenomeen binnen het kaartbladgebied is de Zuidwal vulkaan. De invloed van deze Jurassische vulkaan op de sedimentatie blijkt uit de isopachenkaarten van de Zechstein Groep, de 'Boven Jura' afzettingen en de Rijnland Groep.

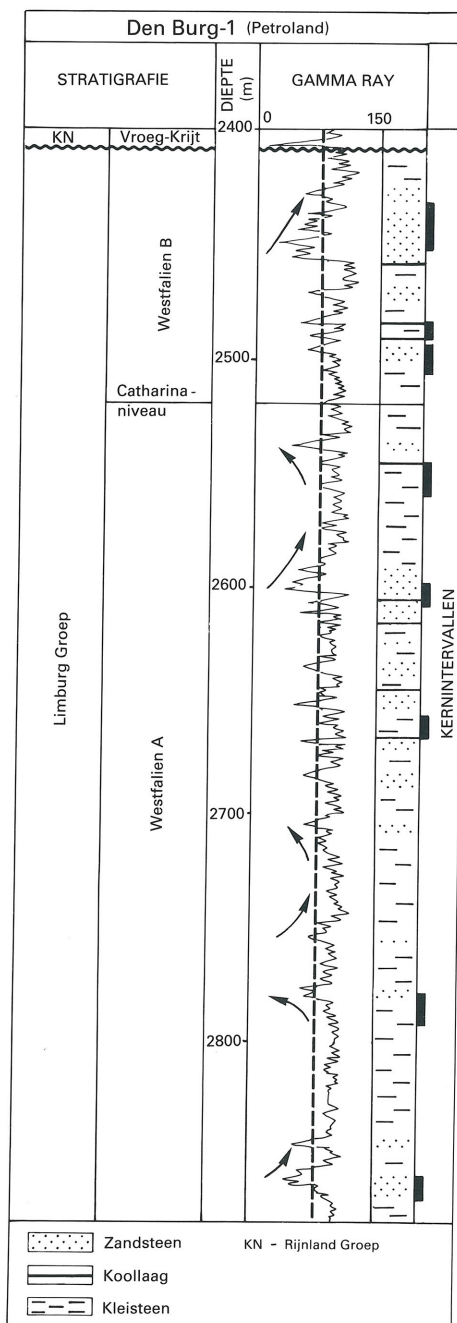
De dieptekaart van de basis van de Noordzee Supergroep (kaart 13) ten slotte laat de daling sinds het begin van het Tertiair zien.

2 Limburg Groep

2.1 Stratigrafie

De sedimenten van de Limburg Groep vormen de oudst aangeboorde afzettingen binnen het kaartbladgebied. Zij bestaan uit een afwisseling van kleisteen met zeer fijn- tot fijnkorrelige zandstenen, siltstenen en koollagen. De sedimenten zijn van Laat-Carbonische (Westfalien) ouderdom.

Figuur 2.1 Opbouw van de Limburg Groep in de boring Den Burg-1. Gegra-deerde sequenties zijn aangegeven met pijlen: naar links coarsening-up-ward, naar rechts fining-upward.



Over het algemeen wordt de Limburg Groep in het kaartbladgebied discordant bedekt door de Boven-Rotliegend Groep van Vroeg-Permische ouderdom (kaart 1). Een uitzondering vormt het zuidelijk deel van het kaartbladgebied waar sedimenten van de Central Graben en de Rijnland Groep (respectievelijk Laat-Jura en Vroeg-Krijt) op de Limburg Groep rusten (kaarten 14 en 15). De groep ontbreekt in het centrum van het Zuidwal gebied ten gevolge van Jurassisch vulkanisme (boring Zuidwal-1).

In geen van de boringen werd de basis van de Limburg Groep bereikt. Omdat ook de seismische informatie onvoldoende is om die basis te kunnen vaststellen, is de dikte van deze groep niet bekend. Vermoedelijk komen onder de continentale afzettingen van de Limburg Groep mariene afzettingen voor van Vroeg-Carbonische ouderdom.

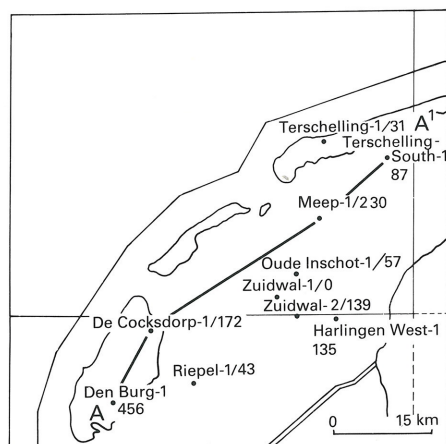
Binnen de Limburg Groep wordt hier slechts één formatie onderscheiden, namelijk de *Coal Measures*. Deze term, die uit de Engelse Carboonstratigrafie is overgenomen, werd door NAM & RGD (1980) geïntroduceerd als formatienaam voor de koolhoudende Boven-Carbonische afzettingen.

Voor de lithologische beschrijving van de afzettingen van de Limburg Groep wordt de, direct ten zuiden van het kaartbladgebied gelegen, boring Den Burg-1 gebruikt als referentieborings (fig. 2.1). Het traject van de Limburg Groep in deze boring is relatief lang (ongeveer 455 m) en er zijn tien, evenredig over het traject verdeelde, kernen beschikbaar. De boringen die de Limburg Groep hebben aangeboord worden getoond in figuur 2.2, met de aangeboorde dikten.

2.1.1 Coal Measures

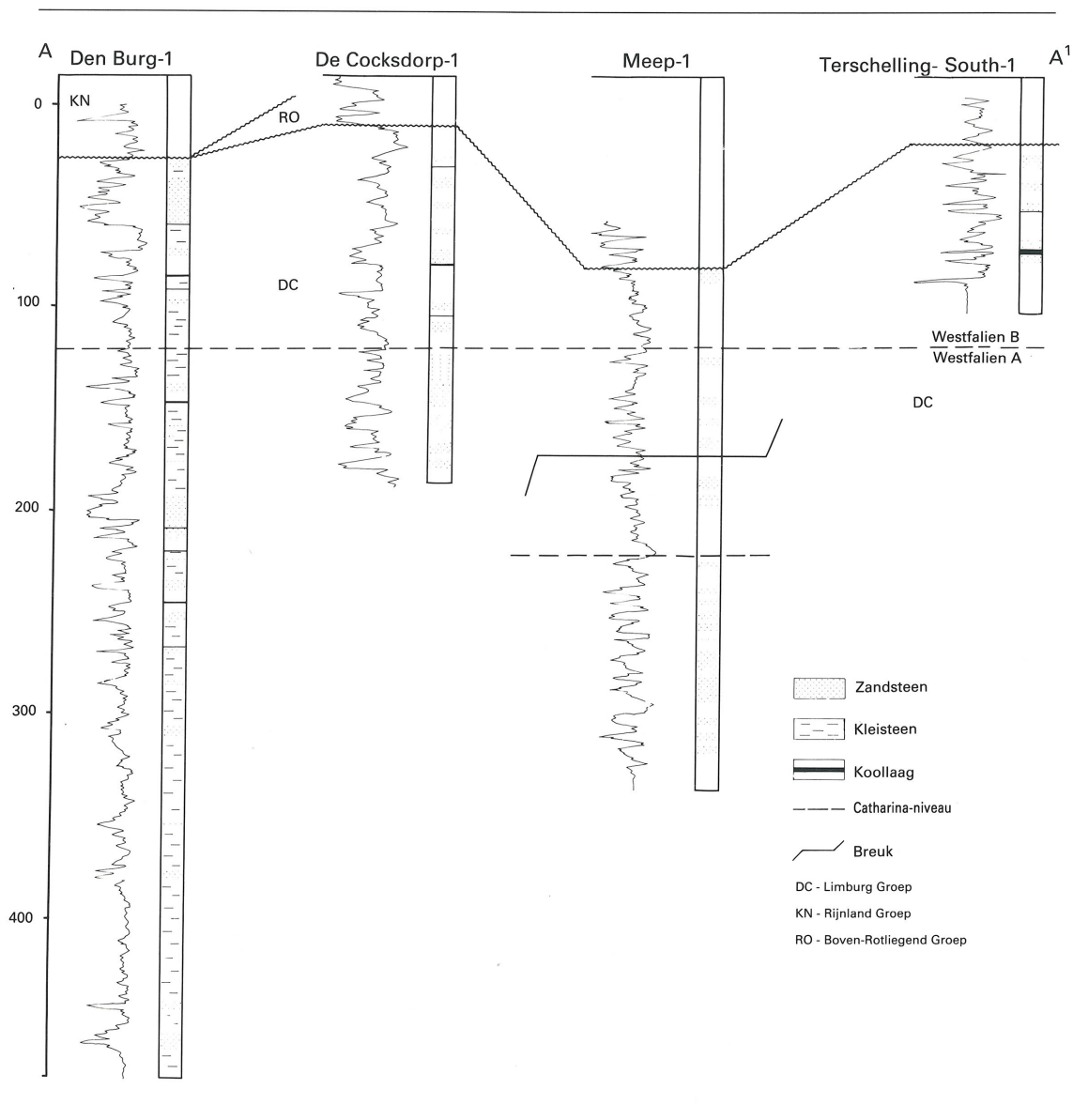
De Coal Measures bestaan in hoofdzaak uit donkergrijs tot violetkleurige siltige kleisteen, waarin zandsteen en koollagen voorkomen (fig. 2.1, 2.3). De kleistenen zijn glimmerhoudend en bevatten fijn verdeeld plantenhaksel; plaatselijk komen, door sideriet verharde, doorwortelde of gebioturbeerde niveaus voor. De zandstenen komen voor in naar boven toe vergroevende en verfijnende sequenties. De zandstenen zijn rijk aan glimmers en (zeer) fijnzandig tot siltig. Op grond van logkarakteristieken blijkt dat in dit gebied de top van de Coal Measures het meest zandig is (fig. 2.1, 2.3). De dikte van de individuele zandsteenlichamen varieert sterk en bereikt een waargenomen maximale dikte van ruim 9 meter in de boring Den Burg-1. Koollagen of

Figuur 2.2 Diktekaart van de aangeboorde trajecten van de Limburg Groep en de ligging van het stratigrafisch profiel A-A'.



koolhoudende lagen komen in vrijwel alle bestudeerde trajecten van de Coal Measures voor. Zij zijn vaak slechts enkele mm tot enkele cm dik, maar kunnen ook een dikte bereiken van ongeveer 2 m (Terschelling South-1). Koollagen komen voor aan de toppen van zowel naar boven toe vergroevende als verfijnende sequenties. Tevens komen koollagen, of koolhoudende sedimenten, voor in siltige kleistenen die geen deel uit maken van deze sequenties.

De recent gepubliceerde kaart van top Carboon (Van Wijhe, 1987) geeft voor het grootste deel van het kaartbladgebied een Westfalien A ouderdom (fig. 2.4). Eigen biostratigrafisch onderzoek echter wijst in een aantal boringen op de aanwezigheid van Westfalien B aan de top van de Limburg Groep (RGD 1964; RGD 1965; RGD 1973; RGD 1985b; RGD 1985c; RGD 1987; RGD 1988b;



Figuur 2.3 Stratigrafisch profiel A-A', met het Catharina-niveau als referentieniveau. Voor alle boringen zijn

gamma ray logs gebruikt. Naar RGD, 1989b. De ligging van dit profiel wordt getoond in figuur 2.2.

RGD 1988c). De aanwezigheid van Westfalien B wordt tevens op grond van logcorrelaties vermoed, daar in een aantal boringen het Catharina-niveau aanwezig is, de grens tussen het Westfalien A en B (RGD 1989b; fig. 2.3). De relatief geringe dichtheid van de data rechtvaardigt op dit moment echter nog geen aanpassing van de top Carboon kaart van Van Wijhe (1987).

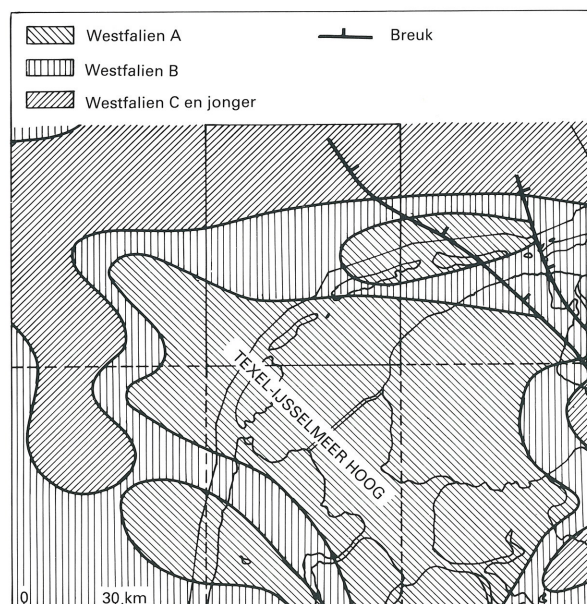
De Coal Measures in het kaartbladgebied werden afgezet in een opeenvolging van afwisselend fluviatiele, deltaïsche en lacustriene milieus, waarin dunne mariene intercalaties voorkomen (RGD 1989b).

In geen van de boringen binnen het kaartbladgebied, noch in boringen in de directe omgeving ervan, zijn de Coal Measures volledig doorboord.

2.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Het kleiige karakter van de continentale afzettingen van de Limburg Groep alsook de grote verbreiding van de ingeschakelde mariene sedimenten, wijzen op een landschap dat tijdens de afzetting van de Limburg Groep zeer vlak moet zijn geweest en nauwelijks boven de zeespiegel heeft gelegen. Zowel het tropische klimaat met een overvloedige plantengroei, alsook het zeer vlakke landschap, waar de afvoer van het oppervlaktewater vaak stagneerde, hebben bijgedragen tot de vorming van meren en moerassen, waarin zich fijnkorrelige sedimenten hebben afgezet. Naar boven toe verfijnende sequenties worden in het algemeen als afzettingen van meanderende rivieren geïnterpreteerd (Moody Stuart, 1966). Dit type rivieren ontstond in een gebied met gering reliëf. Waar deze riviersystemen in meren uitstroomden, vormden zich naar boven toe vergroevende sequenties. Zowel in de moerassen als in de rivieren trad veenvorming op. In de rivieren vond dit plaats in afgesneden stroomgeulen. Uit het veen is na een inkolingsproces tengevolge van diepe begraving tenslotte steenkool ontstaan.

Figuur 2.4 Afgedekte geologische kaart van de top van het Carboon. Gewijzigd, naar Van Wijhe, 1987.



3 Boven-Rotliegend Groep

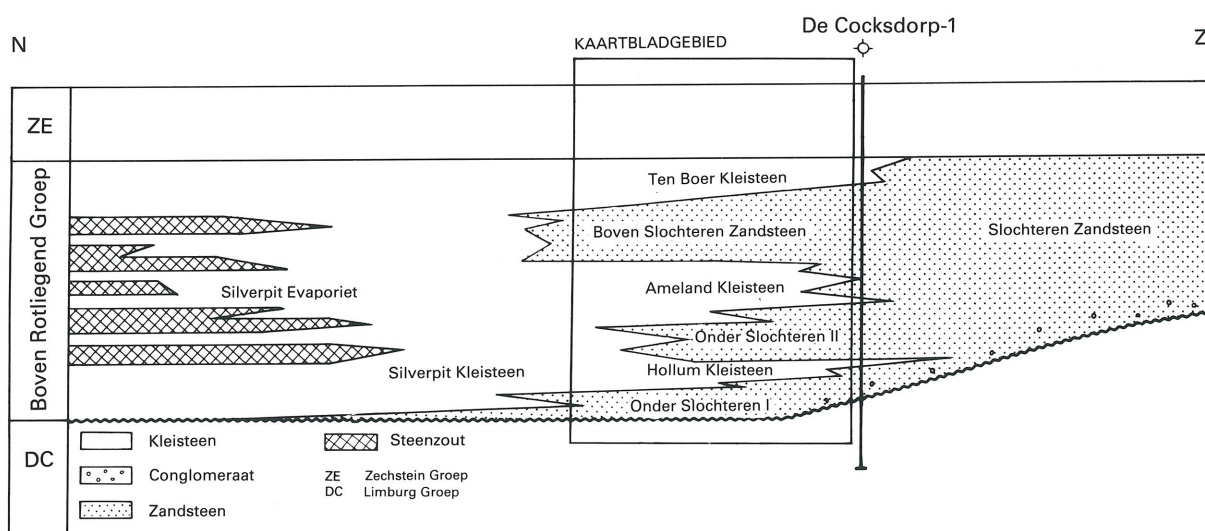
3.1 Stratigrafie

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 wordt onderverdeeld in twee formaties, de Slochteren Zandsteen Formatie en de Silverpit Kleisteen Formatie, die binnen het kaartbladgebied lateraal in elkaar overgaan (fig. 3.1). De Boven-Rotliegend Groep is van Vroeg-Permische ouderdom.

De sedimenten van de Boven-Rotliegend Groep rusten discordant op de Carbonische afzettingen van de Limburg Groep, gescheiden door de Saalische discordantie (kaart 1). Direct op de Boven-Rotliegend Groep volgen in het grootste deel van het gebied de afzettingen van de Laat-Permische Zechstein Groep (kaart 2). Het contact tussen deze twee groepen is concordant. In het zuidwesten en zuiden van het kaartbladgebied waar de Boven-Rotliegend Groep door de Rijnland Groep bedekt wordt, is het contact discordant (kaart 15).

De dikte van het Boven-Rotliegend neemt in noordelijke richting toe van ruim 200 m in De Cocksdorp-1 tot meer dan 350 m in het offshore gebied ten noorden van het kaartblad. Rond het Zuidwal gebied in het zuiden van het kaartbladgebied bedraagt de dikte 160 tot 180 m. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van het zogenaamde Zuidwal Hoog tijdens de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep (fig. 3.2).

Behoudens de Silverpit Evaporiet komen alle in NAM & RGD (1980) gedefinieerde laagpakketten van de Slochteren Zandsteen en de Silverpit Kleisteen Formaties binnen het kaartbladgebied voor (fig. 3.1). De stratigrafische opeenvolging van de Boven-Rotliegend Groep wordt geïllustreerd aan de hand van de direct ten zuiden van het kaartbladgebied gelegen boring De Cocksdorp-1 (fig. 3.3), waar alle laagpakketten te zamen voorkomen. De lokatie van deze en andere relevante boringen wordt getoond in figuur 3.4.



Figuur 3.1 Geschematiseerd stratigrafisch diagram van de Boven-Rotliegend Groep. De positie van het kaart-

bladgebied is aangegeven, alsmede de ligging van de boring De Cocksdorp-1 (fig. 3.3), direct ten zuiden van

het kaartbladgebied. Gewijzigd naar NAM & RGD, 1980.

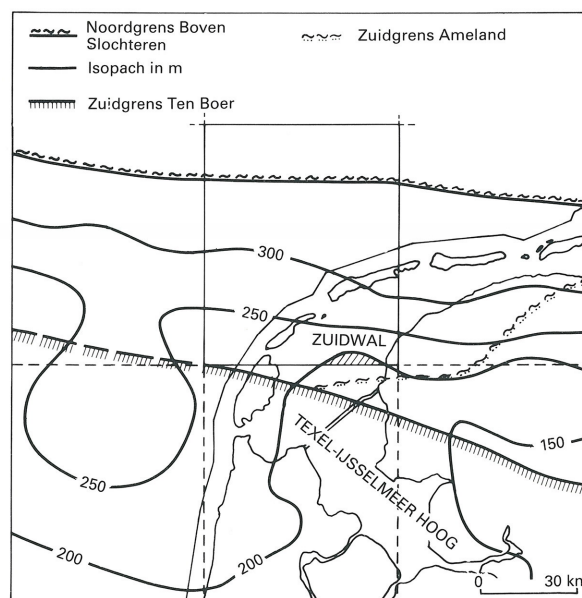
3.1.1 Slochteren Zandsteen Formatie

In de Slochteren Zandsteen Formatie kunnen in boringen in het zuiden van het kaartbladgebied drie zandsteenpakketten worden onderscheiden, die stratigrafisch van elkaar zijn gescheiden door kleisteedtongen van de Silverpit Kleisteen Formatie (fig. 3.1). Het bovenste zandpakket is de Boven-Slochteren Zandsteen. Het middelste en onderste zandpakket vormen de Onder-Slochteren Zandsteen. Deze tweedeling van de Onder-Slochteren Zandsteen is in een groot gebied in het noorden van Nederland te herkennen. Ten zuiden van het kaartbladgebied ontbreken de kleisteen, zodat er binnen de Slochteren Zandsteen Formatie geen laagpakketten onderscheiden worden (fig. 3.1, 3.5).

De *Onder-Slochteren Zandsteen* komt slechts voor in het zuidelijke deel van het kaartbladgebied en wordt door vervanging met de Silverpit Kleisteen Formatie in tweeën gedeeld (fig. 3.1). Het basale deel wordt informeel de Onder-Slochteren I genoemd en is opgebouwd uit zandsteenbanken met ingeschakelde conglomeraat- en kleisteenlaagjes. De zandsteenbanken hebben een erosieve basis met een basaal conglomeraat. Voorts wordt fining-upward waargenomen in de zandstenen, evenals kleinschalige scheve gelaagdheid. De conglomeraten bezitten een fijnzandige tot kleiige matrix. Het bovenste deel van de Onder-Slochteren Zandsteen, informeel de Onder-Slochteren II, bestaat uit fijne tot grove, rood tot roodbruin gekleurde kwartszandstenen, waarvan de korrels in het algemeen goed zijn afgerond. Het gamma ray logpatroon van de Onder-Slochteren II in De Cocksdorp-1 wijst op het relatief schone karakter van deze zandsteen (fig. 3.3).

In de boringen Zuidwal-2 en Oude Inschot-1 ligt een sterk verdunde Onder-Slochteren Zandsteen discordant op de Limburg Groep (fig. 3.6). De verklaring voor deze verdunning wordt gezocht in de aanwezigheid van een depositioneel hoog, het Zuidwal Hoog. In noordelijke richting gaat de eenheid over in de Silverpit Kleisteen Formatie (fig. 3.6). Opmerkelijk is tevens de diktetoename van het onderste gedeelte van de eenheid noordwestelijk van het kaartbladgebied (fig. 3.5).

Figuur 3.2 Gereconstrueerde diktekaart van de Boven-Rotliegend Groep. De noordelijke verbreidingsgrens van de Boven-Slochteren Zandsteen is weergegeven, alsmede de zuidelijke verbreidingsgrenzen van de Ameland Kleisteen en de Ten Boer Kleisteen.



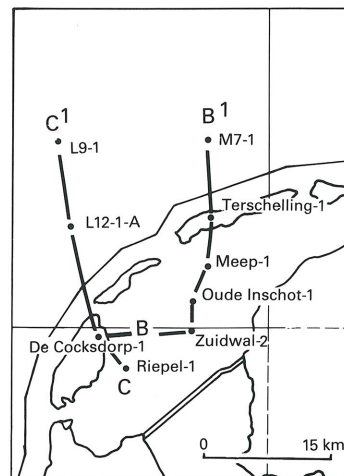
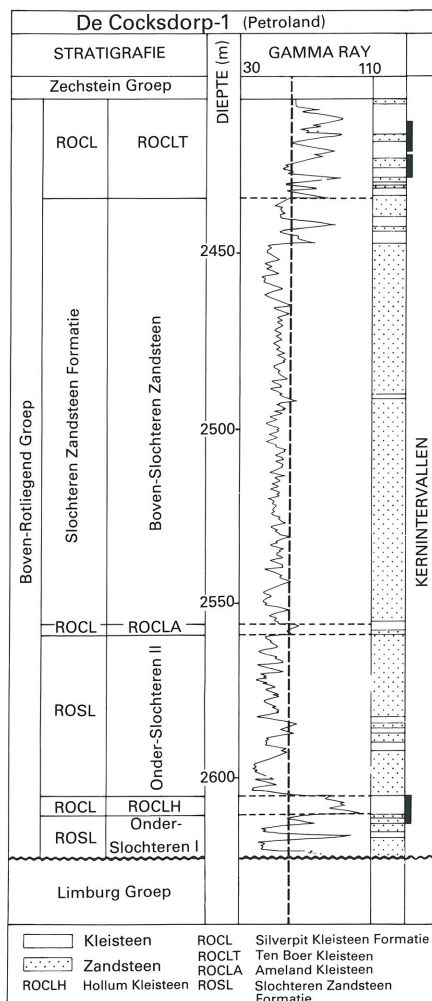
Binnen het kaartbladgebied wijst de associatie van lithofacies op een fluviatiel en mogelijk eolisch milieu van afzetting. Het basale deel van de eenheid, de Onder-Slochteren I, lijkt geheel afgezet in verwilderde riviersystemen, terwijl in de Onder-Slochteren II ook eolische afzettingen voorkomen. Dit is in overeenstemming met literatuurgegevens (Van Wijhe et al., 1980; Van Lith, 1983; Glennie, 1984). Aangenomen wordt dat de sedimenten in het binnen het kaartbladgebied gelegen overgangsgebied tussen de Onder-Slochteren Zandsteen en de Silverpit Kleisteen Formatie werden afgezet in een sabkha-achtig milieu.

De *Boven-Slochteren Zandsteen* kan in alle boringen binnen het kaartbladgebied worden herkend. Zij bestaat in het zuidelijke deel van het kaartbladgebied uit relatief schone zandstenen. Naar het noorden toe gaat de eenheid lateraal over in de Silverpit Kleisteen Formatie. Dit uit zich door de inschakeling van zandige en siltige kleistenen (Terschelling-1). De dikte van het laagpakket varieert van 105 m in Zuidwal-2 tot ongeveer 135 m in Meep-1.

De Boven-Slochteren Zandsteen bestaat binnen het kaartbladgebied voornamelijk uit roodbruin gekleurde, goed gesorteerde, fijne zandstenen. Verder naar het zuiden komen plaatselijk zeer grofkorrelige zandstenen voor (De Cocksdorp-1, Riepel-1). De zandstenen zijn weinig verkit en

Figuur 3.3 Opbouw van de Boven-Rotliegend Groep in de boring De Cocksdorp-1 (Petroland).

Figuur 3.4 Overzichtskaart van de voor de beschrijving van de Boven-Rotliegend Groep gebruikte boringen en de lokaties van de profielen B-B' en C-C' (respectievelijk figuur 3.5 en 3.6).



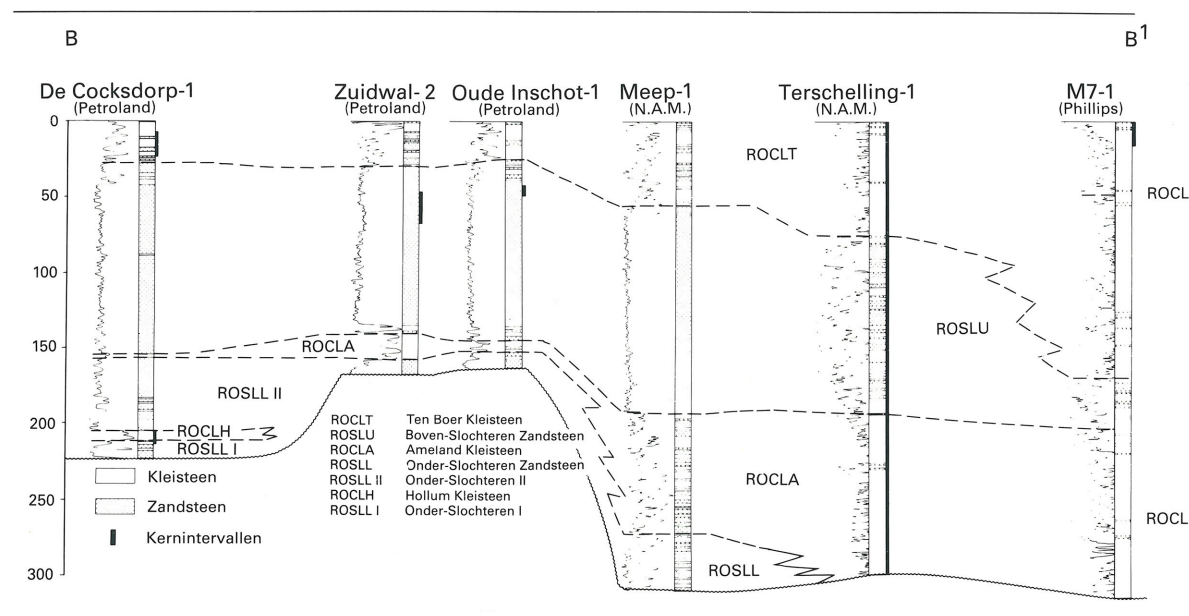
bestaan voornamelijk uit kwarts; daarnaast komen in geringe hoeveelheden veldspaat, vulkanisch materiaal en schaliefragmenten voor (De Cocksdorp-1, Oude Inschot-1). De roodkleuring gaat veelal in het bovenste tiental meters geleidelijk over naar beige.

De goed gesorteerde zandstenen van de Boven-Slochteren Zandsteen worden beschreven als eolische afzettingen, gevormd in een woestijnachtig milieu (o.a. Blanche, 1973; Glennie, 1972, 1983; Marie, 1975; Van Adrichem Boogaert, 1976 en Van Wijhe et al., 1980). De wat grovere en minder goed gesorteerde zandstenen worden geïnterpreteerd als afzettingen van wadi's en verwilderde rivieren. Evenals dit het geval is bij de Onder-Slochteren Zandsteen, wordt aangenomen dat sedimenten in het overgangsgebied met de Silverpit Kleisteen Formatie, zijn afgezet in een sabkha-achtig milieu.

3.1.2 Silverpit Kleisteen Formatie

De Silverpit Kleisteen Formatie is het distale equivalent van de Slochteren Zandsteen Formatie en bestaat hoofdzakelijk uit een afwisseling van rood, roodbruin, of bruin gekleurde siltige klei- en siltstenen. De Silverpit Kleisteen Formatie bevat plaatselijk inschakelingen van dunne dolomiet- en anhydrietlaagjes en in het overgangsgebied met de Slochteren Zandsteen Formatie fijne zandstenen. Binnen het kaartbladgebied bereikt deze formatie een dikte van 150 m (Terschelling-1, fig. 3.5). Verder naar het noorden neemt de dikte van de Silverpit Kleisteen Formatie toe.

In het overgangsgebied met de Slochteren Zandsteen Formatie wordt de Silverpit Kleisteen Formatie als volgt onderverdeeld: (van onder naar boven) de Hollum Kleisteen, de Ameland



Figuur 3.5 Stratigrafisch profiel B-B', met de basis van de Zechstein Groep als referentieniveau. Dit profiel toont de invloed van het Zuidwal Hoog

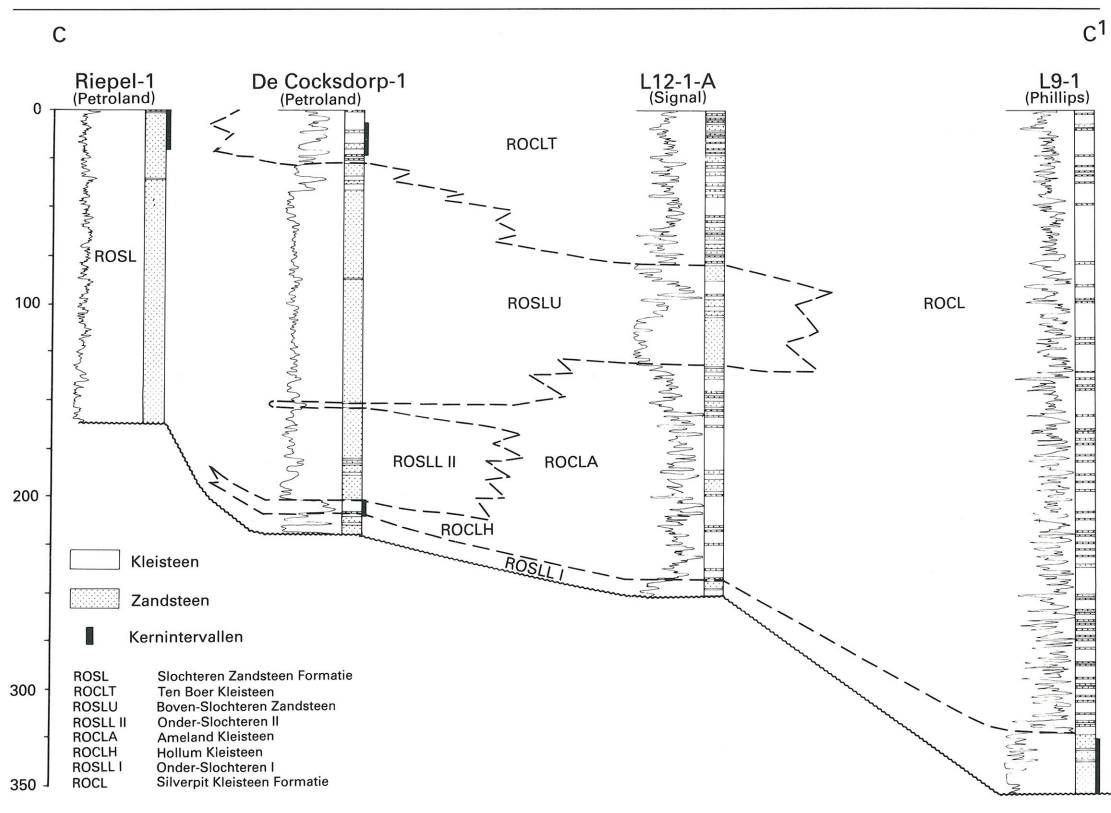
tijdens de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep. De ligging van dit profiel wordt getoond in figuur 3.4.

Kleisteen en de Ten Boer Kleisteen (fig. 3.1). Ze worden allemaal als playameer afzettingen geïnterpreteerd (Glennie, 1984).

De *Hollum Kleisteen* wordt alleen onderscheiden in het zuidelijke deel van het kaartbladgebied. In De Cocksdorp-1 heeft deze eenheid een dikte van 5 m. In afwijking van het in NAM & RGD (1980) getoonde voorbeeld bevinden zich in De Cocksdorp-1 (fig. 3.3) ook nog zandige afzettingen onder de Hollum Kleisteen.

De *Ameland Kleisteen* wordt in het gehele kaartbladgebied onderscheiden. In De Cocksdorp-1 betreft het een slechts enkele meters dikke kleistein (fig. 3.3). Verder naar het noorden neemt de dikte toe. In het noordoosten van het kaartbladgebied, waar de Onder-Slochteren Zandsteen niet is ontwikkeld, rust de Ameland Kleistein direct op de Limburg Groep (fig. 3.5, 3.6).

De *Ten Boer Kleistein* is de bovenste eenheid van de Silverpit Kleistein Formatie en wordt bedekt door de Kupferschiefer van de Zechstein Groep. De Ten Boer Kleistein neemt in noordelijke richting in dikte toe, van ongeveer 25 m in De Cocksdorp-1 tot meer dan 70 m in Terschelling-1 (fig. 3.5). Naar het zuiden wordt deze eenheid zandiger (De Cocksdorp-1) en gaat ten zuiden van het kaartbladgebied lateraal over in de Slochteren Zandsteen (fig. 3.6).



Figuur 3.6 Stratigrafisch profiel C-C', met de basis van de Zechstein Groep als referentieniveau. Dit profiel toont de overgang van het Texel-IJsselmeer

Hoog naar het Zuidelijk Perm Bekken. De ligging van het profiel wordt getoond in figuur 3.4.

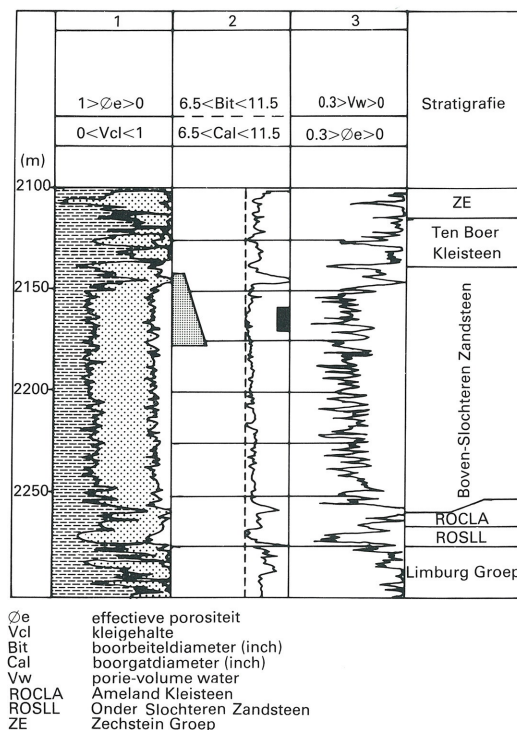
3.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De Boven-Rotliegend Groep werd onder continentale omstandigheden afgezet in het intra-cratonische Zuidelijk Perm Bekken (fig. 10.1). Tijdens de afzetting van de Onder-Slochteren Zandsteen lag het kaartbladgebied binnen het bereik van een verwilderd fluviaal systeem. Tijdens de afzetting van het onderste deel van deze eenheid stonden het Zuidwal Hoog, en aanvankelijk vermoedelijk ook het Texel-IJsselmeer Hoog, nog aan erosie bloot.

In het centrale deel van het bekken vormde zich een meer en aan de zuidrand hiervan ontstond, onder invloed van het aride klimaat, een woestijngebied. De afzettingen binnen het kaartbladgebied vertonen de interactie tussen de noordelijke uitbreiding van het woestijngebied en de zuidelijke uitbreiding van het meer. De Hollum, Ameland en Ten Boer Kleisteen representeren de lacustriene afzettingen, de Onder- en de Boven-Slochteren Zandsteen de eolische en fluviale afzettingen van het woestijngebied. De verschuivingen van de faciesgrens tussen deze gebieden gedurende de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep werden beïnvloed door variaties in de waterhoogte van het meer enerzijds en de sedimentaanvoer anderzijds. Tijdens afzetting van de Hollum Kleisteen breidde het meer zich uit over het grootste deel van het kaartbladgebied; alleen op het Zuidwal Hoog vond geen afzetting of zelfs erosie plaats. Dit hoog werd pas in een later stadium van afzetting van de Onder-Slochteren Zandsteen bedekt door sediment.

Na de afzetting van de Onder-Slochteren Zandsteen breidden de lacustriene afzettingen zich over het gehele kaartbladgebied uit en vond sedimentatie plaats van de Ameland Kleisteen. Uit de ingeschakelde zandstenen in de Ameland Kleisteen blijkt dat de afzetting deels plaats vond in een sabkha-achtig milieu.

Figuur 3.7 Petrofysische evaluatie van het Boven-Rotliegend traject in Oude Inschot-1. Kolom 1: kleigehalte Vcl, bepaald m.b.v. de gamma ray log, en effectieve porositeit ϕ_e . De effectieve porositeit werd verkregen met gebruikmaking van de akoestische logs (Raymer-Hunt vergelijking in single porosity model; Raymer et al., 1980) na correctie voor het kleigehalte. Kolom 2: boorgatdiameter (Cal) en boorbeiteldiameter (Bit), beiden in inches; bovendien zijn geteste en gekerde intervallen aangegeven (appendix D). Kolom 3: effectieve porositeit ϕ_e en het volume water in de poriën Vw. Door de hoge watersaturatie (Sw) vallen laatstgenoemde curven praktisch samen. Voor de bepaling van de watersaturatie werd de Indonesia-formule gebruikt, die geschikt is voor kleiige formaties (Fertl, 1987). Diepten zijn werkelijke diepten.



De afzettingen van de Boven-Slochteren Zandsteen representeren een nieuwe periode van noordwaartse uitbreiding van het woestijngebied. Sedimentatie vond plaats onder eolische en fluviatiele omstandigheden. Vervolgens breidde het meer zich weer geleidelijk zuidwaarts over het kaartbladgebied uit, en werd de Ten Boer Kleisteen afgezet, de bovenste eenheid van de Boven-Rotliegend Groep.

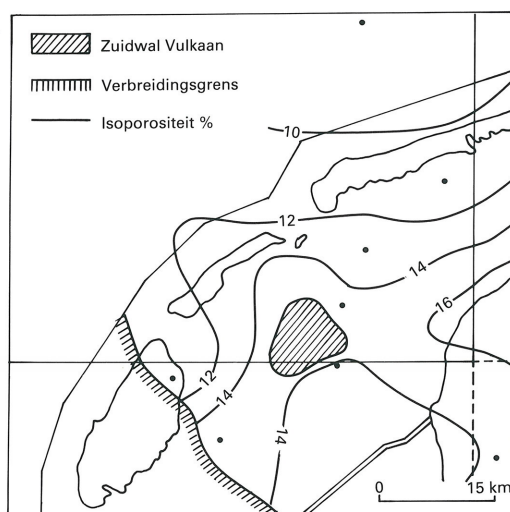
De verbreidingsgrens van de lacustriene afzettingen ligt juist ten zuiden van het kaartbladgebied; ten zuiden hiervan bestaat de Boven-Rotliegend Groep geheel uit fluviatiele en eolische afzettingen (fig. 3.5, 3.6). Deze begrenzing van de verbreiding van de lacustriene afzettingen wordt toegeschreven aan de invloed van het Texel-IJsselmeer Hoog, dat een geringere daling onderging dan de meer noordelijk gelegen gebieden.

De herkomstgebieden van de Slochteren zandstenen hebben vermoedelijk ten zuiden en ten oosten van het kaartbladgebied gelegen. De grovere zanden en conglomeraten van de Onder-Slochteren Zandsteen zijn voornamelijk uit het zuidelijke brongebied afkomstig, en werden naar het noorden getransporteerd via wadi's, afkomstig van het Varistische gebergte (Stäuble & Milius, 1970; Van Wijhe et al., 1980). De eolische afzettingen van het Boven-Rotliegend zijn waarschijnlijk afkomstig uit een veel groter gebied, dat zich tot ver ten oosten van het kaartbladgebied uitstrekte. Hierbij heeft vermoedelijk ook uitblazing van de in verwilderde rivieren en wadi's afgezette sedimenten een belangrijke rol gespeeld (Glennie, 1972). Tijdens de afzetting van de Boven-Rotliegend Groep overtrof de bekkendaling de sedimentatie, en aan het begin van het Laat-Perm was er een grote depressie onder zeeniveau ontstaan (Glennie, 1984).

3.3 Petrofysische evaluatie

De zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep vormen in het Nederlands territorium en het Continentale Plat een van de belangrijkste exploratiedoelen. Van elf boringen uit het kaartbladgebied en zijn directe omgeving werden de afzettingen van deze groep petrofysisch geëvalueerd (appendix C; RGD 1990b). In al deze boringen zijn de zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep watervoerend (appendix D). Als voorbeeld van een log-evaluatie van het Boven-Rotliegend reservoirtraject wordt in figuur 3.7 het resultaat getoond voor de boring

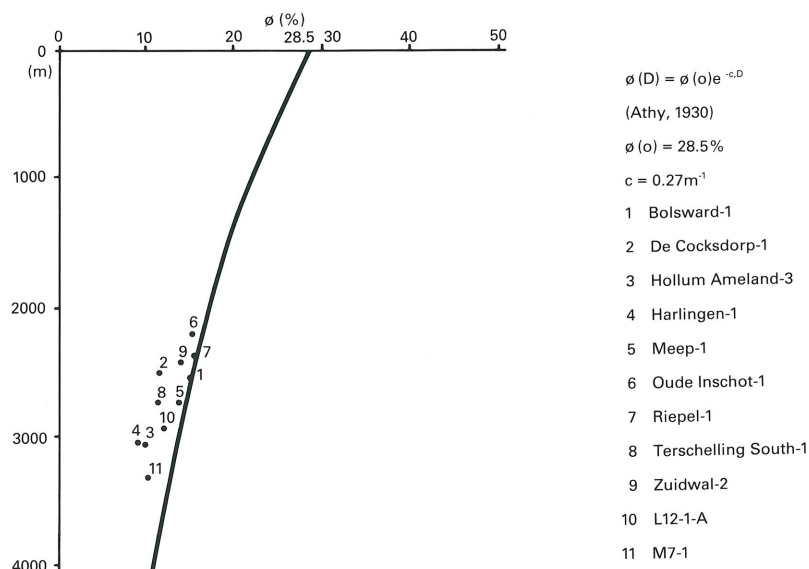
Figuur 3.8 Schematische contourkaart van de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit ϕ_{em} van de Boven-Rotliegend Groep (appendix C).



Oude Inschot-1. In figuur 3.8 is de verdeling van de gemiddelde effectieve porositeit (ϕ_{em}) van de Boven-Rotliegend Groep in de omgeving van het kaartbladgebied schematisch weergegeven. Deze porositeitsverdeling verloopt conform de faciesverdeling van de Slochteren Zandsteen Formatie.

De gemiddelde effectieve porositeiten van de Boven-Rotliegend reservoirtrajecten zijn lager dan men op grond van de huidige begravingdiepte zou mogen verwachten. Voor de reductie van de porositeit als gevolg van begraving wordt voor de Boven-Rotliegend zandstenen uitgegaan van de compactiecurve in figuur 3.9. De waarde van de oppervlakteporositeit (28.5%) valt binnen het bereik van oppervlakteporositeiten die door Nagtegaal (1979) wordt gegeven, nl. van 26% (wadi facies) tot 40% (dune top facies). Burial history studies wijzen echter uit dat de Boven-Rotliegend Groep in het gebied van het kaartblad in het verleden nooit dieper begraven is geweest dan nu het geval is (Perrot & Van der Poel, 1987). De porositeitsreductie werd behalve door mechanische compactie ook door cementatie veroorzaakt. In geringe mate zijn kwarts, anhydriet, calciet en dolomiet als cement aanwezig. Daarnaast blijken de kwartskorrels een coating van hematiet te hebben. Bij de vermindering van de porositeit heeft waarschijnlijk vooral vroeg-diagenetische cementatie een rol gespeeld. Gezien de geringe begravingdiepte is het niet waarschijnlijk dat de vorming van het authigene kleimineraal illiet heeft bijgedragen tot de reductie van de reservoir-kwaliteit.

Figuur 3.9 Porositeit versus diepte plot voor de Boven-Rotliegend Groep. De getekende curve is de compactiecurve volgens de relatie van Athy (1930) met een oppervlakteporositeit voor zandsteen $\phi(0) = 28.5\%$. Voor de constante c werd de waarde 0.27 gehanteerd (Sclater & Christie, 1980). De datapunten vertegenwoordigen de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit van de Boven-Rotliegend Groep als geheel (appendix C).



4 Zechstein Groep

4.1 Stratigrafie

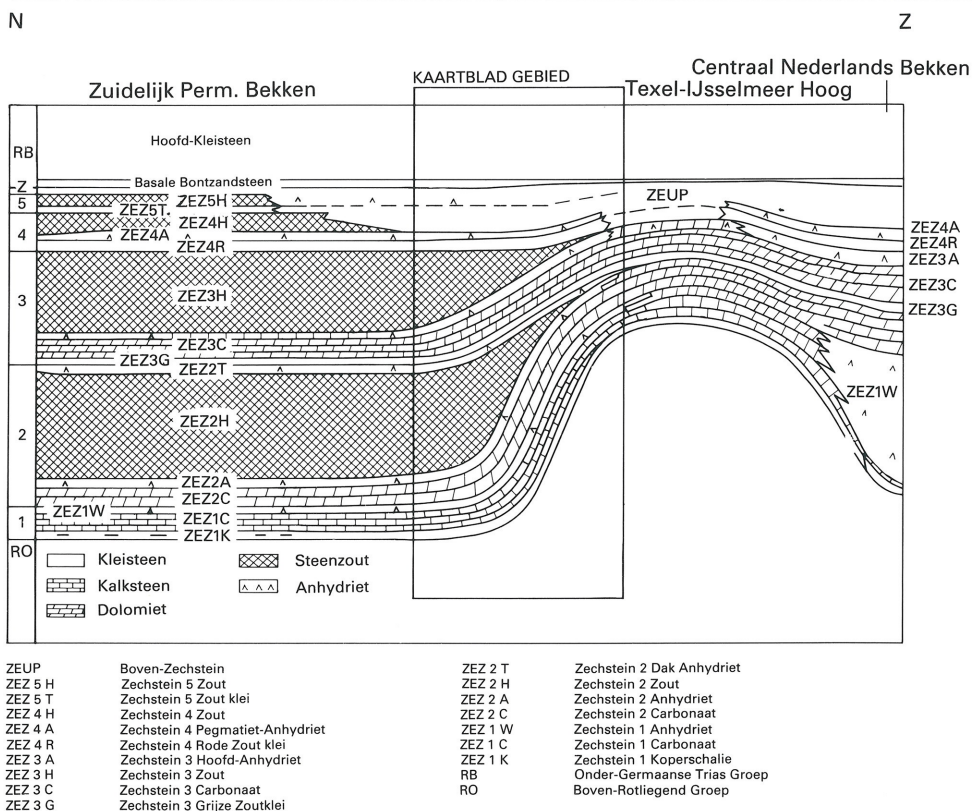
De Zechstein Groep is hoofdzakelijk opgebouwd uit evaporieten, gevormd door de episodische instroming en de daaropvolgende indamping van zeewater. Een complete evaporietcyclus is van onder naar boven opgebouwd uit carbonaat/dolomiet – anhydriet – haliet – kalium-magnesium zouten – haliet en anhydriet (Herrmann, 1981).

De Zechstein Groep ligt concordant op de Rotliegend Groep (kaart 2) en wordt in het grootste deel van het gebied discordant bedekt door de Central Graben en Rijnland Groep, van respectievelijk Laat-Jura en Vroeg-Krijt ouderdom (kaarten 14 en 15). In het zuidoostelijke deel van het kaartbladgebied, het Harlingen Subbekken, en in het uiterste noordwesten wordt de Zechstein Groep concordant bedekt door de Onder-Germaanse Trias Groep (kaart 5). De ouderdom van de Zechstein Groep is Laat-Perm (NAM & RGD, 1980; Van Adrichem Boogaert & Burgers, 1983).

De afzettingen van de Zechstein Groep komen voor in het grootste deel van het kaartbladgebied. De grootste gekarteerde dikte bedraagt ruim 1100 m. Op het Zuidwal Hoog en op het Texel-IJsselmeer Hoog in het uiterste zuidwesten van het kaartbladgebied is deze groep afwezig (kaart 4).

Binnen het kaartbladgebied worden in de Zechstein Groep vijf evaporietcycli herkend: de Zechstein 1 tot en met de Zechstein 4 Formatie en de Boven-Zechstein (fig. 4.1). De Boven-Zechstein is een informele eenheid aan de top van de Zechstein Groep. Hiermee wordt

Figuur 4.1 Geschematiseerd stratigrafisch diagram met de opbouw van de Zechstein Groep in het kaartbladgebied en de directe omgeving daarvan. Gewijzigd naar NAM & RGD (1980) en Plomp & Geluk (1988).



afgeweken van de NAM & RGD definitie (1980) van de Zechstein Groep en de overgang naar de Onder-Germaanse Trias Groep. De opbouw van de Zechstein Groep wordt geïllustreerd aan de hand van de juist buiten het kaartbladgebied gelegen boring Harlingen-1, waar een complete sectie aangeboord is (fig. 4.2).

4.1.1 Zechstein 1 Formatie

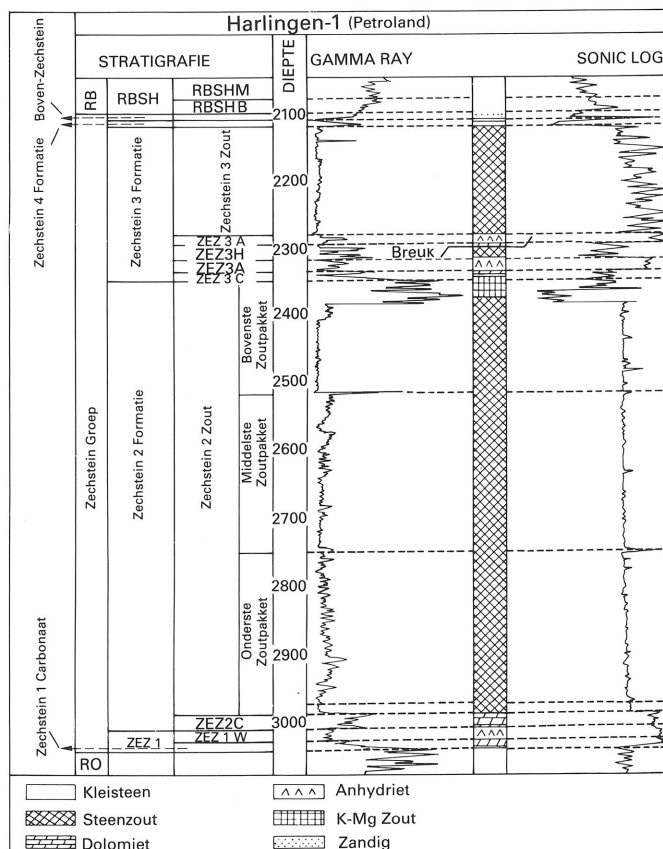
De Zechstein 1 Formatie is opgebouwd uit de Koperschalie, de Zechstein 1 Carbonaat en de Zechstein 1 Anhydriet Laagpakketten. Binnen het kaartbladgebied varieert de dikte van deze formatie van 6 m in de boring Oude Inschot-1 tot 48 m in Terschelling-1.

De *Koperschalie* is een ongeveer 1 m dikke, zwarte kleisteen, rijk 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 hoge uitslag op de gamma-ray log, die wordt veroorzaakt door een hoog gehalte aan radioactieve mineralen.

De *Zechstein 1 Carbonaat* (fig. 4.3A) is een grijsbruine, dolomitische kalksteen. Deze eenheid bevat in het onderste deel enige klei. Naar boven toe neemt het kleigehalte af.

De *Zechstein 1 Anhydriet* (fig. 4.3B) bestaat uit anhydriet met enige dolomiet inschakelingen. In de boringen Zuidwal-2, Riepel-1 en De Cocksdorp-1, op het Texel-IJsselmeer Hoog en het Zuidwal

Figuur 4.2 De opbouw van de Zechstein Groep in de boring Harlingen-1. Op een diepte van circa 2300 m bevindt zich een breuk in de sectie, waardoor een verdubbeling optreedt. De sonic log in het Zechstein 3 Zout is van slechte kwaliteit.



Hoog, zijn deze dolomiet-inschakelingen zo sterk verdikt ten opzichte van de anhydriet, dat deze eenheid hierdoor lithologisch niet meer van de onderliggende Zechstein 1 Carbonaat kan worden onderscheiden (fig. 4.7). In de boringen De Cocksdorp-1 en Riepel-1 komen tevens intraformationele breccie-niveaus voor in de carbonaten.

4.1.2 Zechstein 2 Formatie

De Zechstein 2 Formatie is opgebouwd uit de Zechstein 2 Carbonaat, de Zechstein 2 Basale Anhydriet, het Zechstein 2 Zout en de Zechstein 2 Dakanhydriet Laagpakketten. Dit is de enige formatie die een complete indampingscyclus vertegenwoordigt.

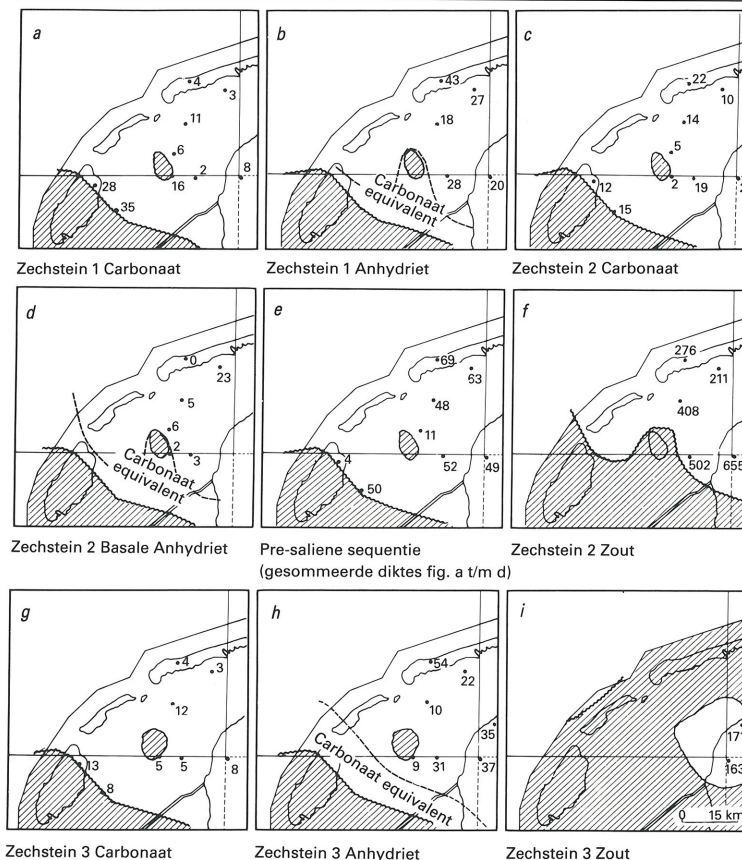
De dikte van deze formatie varieert van enkele meters nabij het Zuidwal Hoog en het Texel-IJsselmeer Hoog tot meer dan 800 m in de zuidoostelijke hoek van het kaartbladgebied. Naast variatie in de afzettingsdikte is dit vooral toe te schrijven aan diktevariatie in het zout ten gevolge van zoutvloei.

De *Zechstein 2 Carbonaat* (Hoofddolomiet) bestaat uit een bruine, compacte kalksteen en dolomiet, met een naar de top toenemend kleigehalte. De dikte van de Zechstein 2 Carbonaat is het kleinst op het Zuidwal Hoog en het Texel-IJsselmeer Hoog (fig. 4.3c).

De *Zechstein 2 Basale Anhydriet* (fig. 4.3d) is opgebouwd uit een wit tot beige gekleurde anhydriet. Op het Zuidwal Hoog is deze eenheid sterk in dikte gereduceerd terwijl zij op het Texel-IJsselmeer Hoog zelfs helemaal ontbreekt.

Figuur 4.3 De verbreiding en dikte van de verschillende laagpakketten van de Zechstein Groep binnen het kaartblad-gebied.

- a Zechstein 1 Carbonaat
- b Zechstein 1 Anhydriet
- c Zechstein 2 Carbonaat
- d Zechstein 2 Basale Anhydriet
- e pré-saliene sequentie (Zechstein 1 Formatie tezamen met de Zechstein 2 Carbonaat en Zechstein 2 Basale Anhydriet)
- f Zechstein 2 Zout
- g Zechstein 3 Carbonaat
- h Zechstein 3 Anhydriet
- i Zechstein 3 Zout

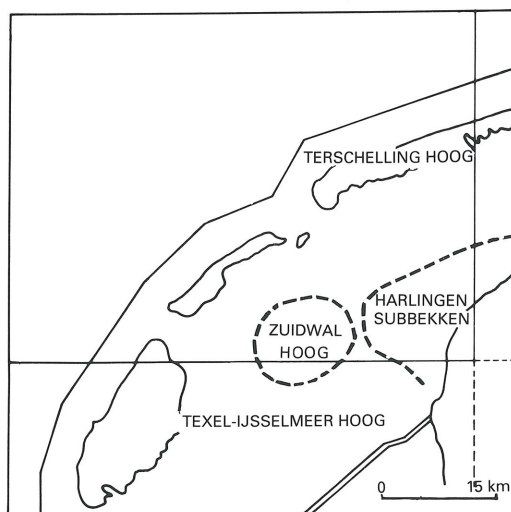


De Zechstein 1 Formatie, het Zechstein 2 Carbonaat en de Zechstein 2 Basale Anhydriet vormen samen het pré-saliene substratum waarop het Zechstein 2 Zout werd afgezet. Diktevariaties in dit substratum geven een indicatie van het aanwezige reliëf voordat het zout neersloeg. De dikte van deze pré-saliene sequentie bedraagt in het Harlingen Subbekken ca. 50 m, en in het offshore gebied ten noorden van het kaartblad van 45 tot 60 m. Op het Zuidwal Hoog bedraagt de dikte 11 m, op het Texel-IJsselmeer Hoog 20 tot 24 m (fig. 4.3e). De grote dikte van deze eenheid nabij Terschelling (65 m), in samenhang met de geringere dikte van het Zechstein 2 Zout in dit gebied, wijst op een depositioneel hoog, het zogenaamde Terschelling Hoog (fig. 4.4). Dit hoog was minder geprononceerd dan het Texel-IJsselmeer Hoog en het Zuidwal Hoog en had een gunstig afzettingsmilieu voor carbonaten en anhydriet.

Het *Zechstein 2 Zout* (fig. 4.3f) is wit gekleurd tot doorschijnend, meest grof- en soms fijnkristallijn. Deze eenheid bereikt binnen het kaartbladgebied een grootste dikte van circa 800 m in het Harlingen Subbekken. Het Zechstein 2 Zout is niet afgezet op het Zuidwal Hoog en het Texel-IJsselmeer Hoog.

Binnen het Zechstein 2 Zout kunnen drie zoutpakketten worden onderscheiden (fig. 4.2). De pakketten worden van elkaar gescheiden door polyhalietlagen. Deze driedeling is regionaal goed te correleren in Nederland en op het aangrenzende Continentaal Plat (fig. 4.7). Het onderste pakket wordt aan de basis gekenmerkt door inschakeling van anhydrietlagen, en daarboven ingeschakelde laagjes kalium-magnesiumzouten in de haliet. Dit geeft het pakket een sterk getand karakter op de gamma-ray log. Naar de top van het pakket toe neemt het kaliumgehalte langzaam af. Binnen het middelste van de drie zoutpakketten kunnen subcycli worden herkend, met elk een naar boven toe toenemend gehalte aan kalium. In het bovenste zoutpakket, dat wordt gekenmerkt door zeer zuiver steenzout, komen aan de top kalium-magnesiumrijke zoutlagen voor. Deze vormen het equivalent van het 'Kaliflöz Stassfurt', die op hetzelfde stratigrafische niveau in West-Duitsland voorkomt (Kulick & Paul, 1987). De dikte van deze kalium-magnesium zouten bedraagt 40 m in de boring Harlingen-1. Ze bereiken in het Harlingen Subbekken een grotere dikte dan gemiddeld in Noord-Nederland. De aanwezige mineralen in deze lagen zijn: carnalliet, kieseriet, sylvien en haliet.

Figuur 4.4 Paleogeografische kaart ten tijde van de afzetting van de Zechstein Groep.



De Zechstein 2 cyclus werd afgesloten met de afzetting van de *Zechstein 2 Dakanhydriet*. Dit is een zuivere anhydriet, met een dikte van enkele meters.

4.1.3 Zechstein 3 Formatie

De Zechstein 3 Formatie wordt onderverdeeld in vier laagpakketten te weten: de Grijze Zoutklei, de Zechstein 3 Carbonaat, de Zechstein 3 Hoofdanhydriet en het Zechstein 3 Zout (fig. 4.2). De dikte van deze formatie varieert van enkele meters aan de rand van het Texel-IJsselmeer Hoog tot 200 m in het Harlingen Subbekken. Buiten het gebied van het Harlingen Subbekken wordt de Zechstein 3 Hoofdanhydriet discordant door Boven-Jura of Onder-Krijt afzettingen bedekt (fig. 4.6).

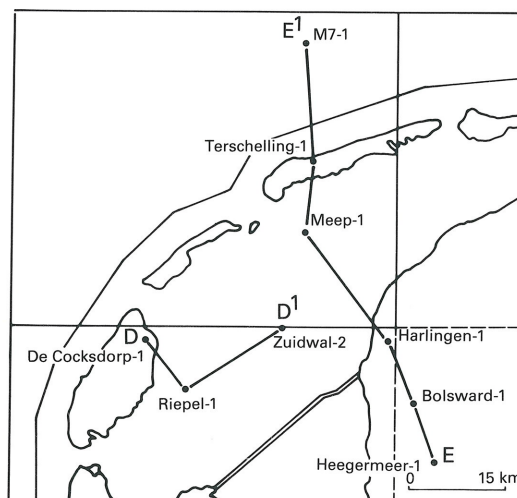
De *Grijze Zoutklei* is een 2 tot 3 m dikke, grijze kleisteen. Deze eenheid heeft een karakteristieke hoge uitslag op de gamma-ray log en is zeer geschikt voor regionale correlaties.

De *Zechstein 3 Carbonaat* (of Plattendolomiet) is opgebouwd uit een fijnkristallijne, beige tot lichtbruine dolomiet. De dikte van deze eenheid binnen het kaartbladgebied bedraagt 2 tot 5 m, met een opmerkelijk grote dikte van 12 m in Meep-1 (fig. 4.3g). In de boringen Riepel-1 en De Cocksdorp-1 zijn in de Zechstein 3 Carbonaat breccies ingeschakeld (fig. 4.6).

De *Zechstein 3 Hoofdanhydriet* bestaat uit witte anhydriet, met in het onderste deel carbonaat-inschakelingen en kleisteenlaagjes. De dikte van deze eenheid varieert sterk binnen het kaartbladgebied (fig. 4.3h). Op het Texel-IJsselmeer Hoog ontbreekt deze eenheid en worden er slechts carbonaat- en kleisteen-inschakelingen aangetroffen; deze worden tot de Zechstein 3 Carbonaat gerekend.

Het *Zechstein 3 Zout* bestaat uit oranje tot rood gekleurd steenzout. Kalium-magnesium zoutlagen zijn binnen dit kaartbladgebied niet aangetroffen in deze eenheid. Het Zechstein 3 Zout bereikt een maximale dikte van 163 m in de boring Harlingen-1 (fig. 4.2, 4.3i).

Figuur 4.5 Ligging van de stratigrafische profielen D-D' en E-E' ten opzichte van het kaartbladgebied.



4.1.4 Zechstein 4 Formatie

De Zechstein 4 Formatie bestaat uit de *Rode Zoutklei*, met een dikte van maximaal 3 m en de 1 m dikke *Zechstein 4 Pegmatiet-Anhydriet*. De formatie wordt alleen in het zuidoostelijke deel van het kaartbladgebied en op het Texel-IJsselmeer Hoog aangetroffen, waarbij op het hoog de Pegmatiet-Anhydriet ontbreekt. In het studiegebied is geen steenzout in deze formatie afgezet.

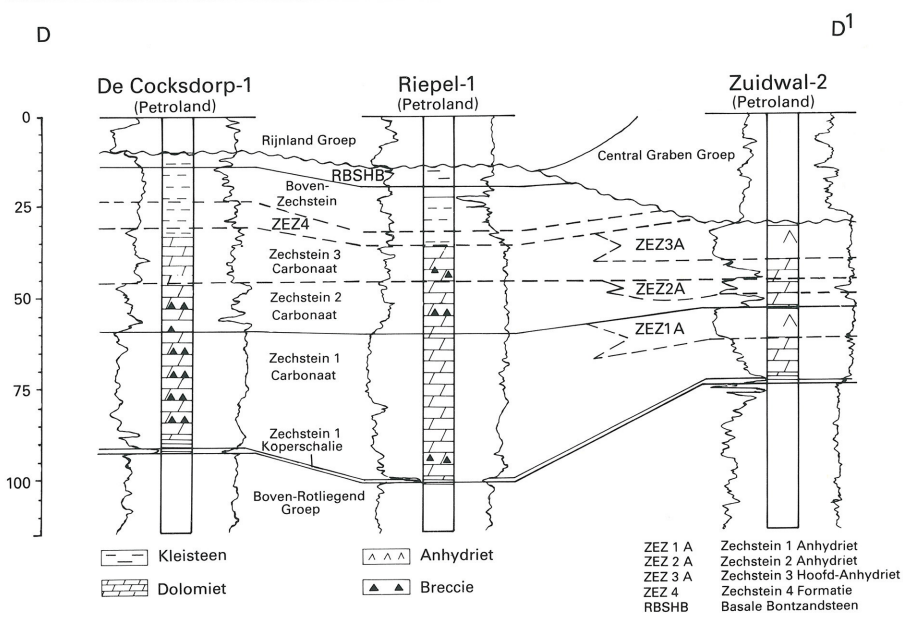
4.1.5 Boven-Zechstein (informeel)

De Boven-Zechstein is een anhydritisch kleisteenpakket tussen de Pegmatiet-Anhydriet en de onderkant van een goed correleerbaar fijnzandig traject aan de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep (zie ook Hoofdstuk 5). Alhoewel NAM & RGD (1980) aan een deel van het overgangspakket tussen de Zechstein Groep en de Onder-Bontzandsteen Groep een Permische ouderdom toekennen, werd dit pakket daar om praktische redenen tot de Basale Bontzandsteen van de Onder-Germaanse Trias Groep gerekend.

De equivalenten van de hogere Zechstein cycli, zoals deze met name in Duitsland worden beschreven (Best, 1989), worden ook in Nederland onderscheiden (RGD 1989a). Dit pakket wordt in voorliggende studie informeel de Boven-Zechstein genoemd. (zie figuur 4.8 voor het verschil in stratigrafische opvattingen).

De Boven-Zechstein is lokaal bewaard gebleven en bestaat uit kleistenen met dunne anhydrietlaagjes. De kleistenen van deze formatie kenmerken zich door lage akoestische snelheden. In dit pakket lijkt nog het equivalent van een vijfde zoutcyclus herkenbaar te zijn. De dikte van de formatie bedraagt circa 10 m.

Figuur 4.6 Stratigrafisch profiel D-D', met de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep als referentieniveau. De sectie verloopt van het Texel-IJsselmeer Hoog (Heegermeer-1) in de richting van het centrum van het bekken (M7-1), en toont het paleoreliëf ten tijde van de afzetting van de Zechstein Groep. De ligging wordt in figuur 4.5 getoond.

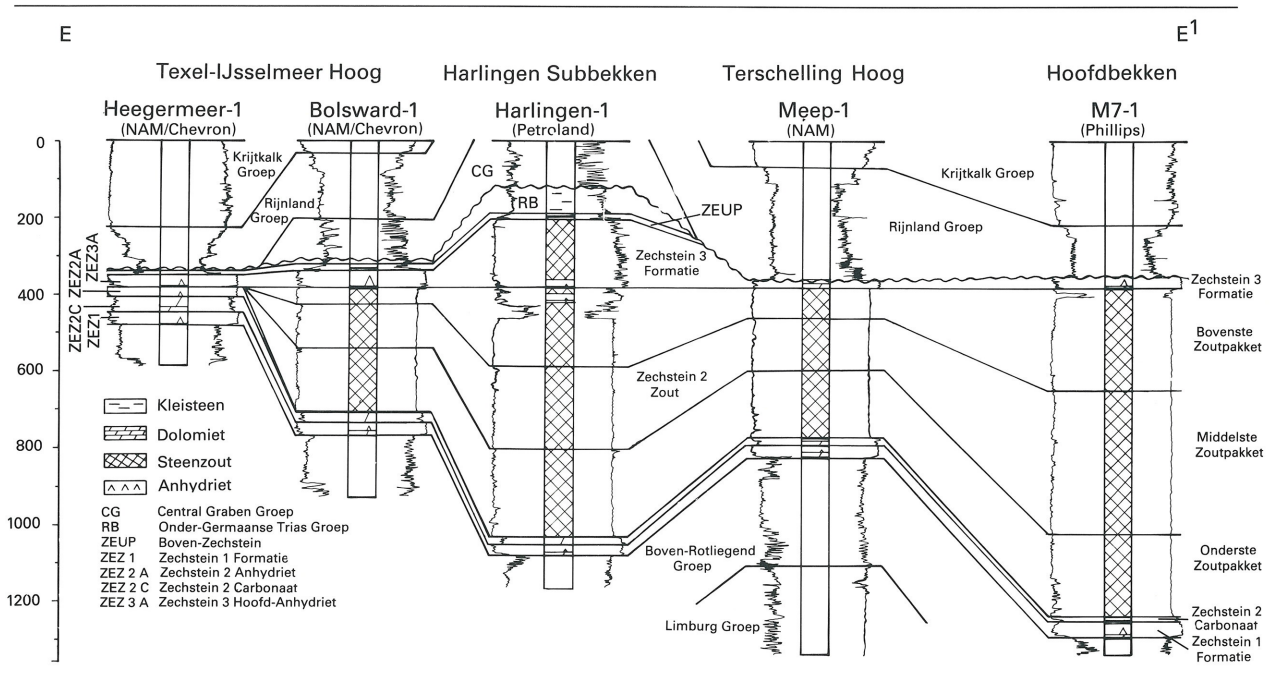


4.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Tijdens de afzetting van de Zechstein Groep maakte het studiegebied nog steeds deel uit van het Zuidelijk Perm Bekken. Aan het einde van het Vroeg-Perm was er een grote topografische depressie onder het zeeniveau ontstaan (Glennie, 1972, 1984). Aan het begin van het Laat-Perm vond een snelle transgressie plaats in deze depressie, mogelijk onder catastrofale omstandigheden (Glennie & Buller, 1983). Deze transgressie luidde de afzetting van meerdere evaporietcycli in.

De evaporietcycli van de Zechstein Groep vingen aan met een influx van zeewater. Vervolgens nam, door afsluiting van de verbinding met de open oceaan en het heersende aride klimaat, de saliniteit van het water toe en daalde gelijktijdig hiermee de zeespiegel. Door de toename van de saliniteit konden de beter oplosbare zouten neerslaan. De afsluiting van de verbinding met de open oceaan wordt toegeschreven aan zeespiegelschommelingen, vermoedelijk veroorzaakt door de afwisseling van glacialen en interglacialen (Ziegler, 1988).

Binnen het gebied van het kaartblad is variatie waar te nemen in de mate van bekkendaling (kaart 4). In het zuidwestelijk deel bevonden zich enkele geprononceerde hogen tijdens de afzetting van de Zechstein Groep, namelijk het Texel-IJsselmeer Hoog en het Zuidwal Hoog (fig. 4.4). Op de flanken van deze hogen ontwikkelden zich carbonaat-anhydriet platformen. Door indamping vielen de hogen grotendeels droog en nam de saliniteit van het zeewater zodanig toe, dat in de diepere delen zout werd afgezet. Met name in het Harlingen Subbekken werden dikke zoutpakketten afgezet. De invloed van de bekkens en hogen op de sedimentatie was voornamelijk tot de Zechstein 1, 2 en 3 Formatie beperkt. De voornamelijk klastische



Figuur 4.7 Stratigrafisch profiel E-E', met als referentieniveau de basis van de Zechstein 3 Formatie. De boringen

zijn gelegen op het Texel-IJsselmeer Hoog en het Zuidwal Hoog, en tonen de gecondenseerde sequentie die op

deze hogen zijn afgezet. De ligging van dit profiel wordt in figuur 4.5 getoond.

De sedimentaire sequentie van de Zechstein Groep begint met de Koperschalie, die in een reducerend milieu werd afgezet (Taylor, 1986). Tijdens afzetting van de Zechstein 1 Formatie vond slechts een gedeeltelijke indamping van het zeewater plaats, en is de saliniteit niet voldoende hoog geweest om steenzout te doen neerslaan. Ingeschakelde carbonaten in de anhydriten wijzen op fluctuaties in de hoeveelheid instromend zeewater. Het nagenoeg geheel droogvallen van het Texel-IJsselmeer Hoog gedurende de afzetting van de sulfaten wordt afgeleid uit de aldaar aanwezige breccies in de carbonaten. Deze worden geïnterpreteerd als uitlogingsbreccies, onder invloed van meteorisch water (Rebelle, 1986).

De Zechstein 2 Formatie vertegenwoordigt een complete indampingscyclus. Na de afzetting van carbonaat en anhydriet werd hier ook zout afgezet. Tijdens de afzetting van het onderste en middelste zoutpakket van het Zechstein 2 Zout varieerde de saliniteit in het bekken enigszins onder invloed van periodieke instroming van zeewater, en mogelijk ook meteorisch water. Grotere fluctuaties hebben geleid tot de vorming van de twee polyhaliet-lagen. Mogelijk weerspiegelen de polyhaliet-lagen plotseling afnemende saliniteit, als gevolg van instroming

Uithuizermeeden-1 (N.A.M.)

Zechstein 4 Rode Zout klei

Zechstein 2 Dak Anhydriet
Zechstein 3 Grijs Zoutklei

N.A.M. & RGD (1980)

RGD (1991)

DIEPTE

GAMMA RAY

SONIC LOG

Zechstein 4 Groep

Zechstein 3 Groep

Zechstein 3 Hoofd-Anhydriet

Zechstein 2 Zout

Legend:

- Kleisteen
- K-Mg Zout
- Steenzout
- Kalksteen
- Anhydriet
- Zandig

Geological Units:

- Onder-Germaanse Trias Groep
- Onder-Bontzandsteen Formatie
- Basale Bontzandsteen
- Hoofd-Kleisteen
- Boven-Zechstein
- Zechstein 2 Formatie
- Zechstein 2 Zout

het bekken. Het bovenste zoutpakket vertoont zeer zuiver steenzout, met aan de top kalium-magnesium zoutlagen. De zuivere samenstelling van het bovenste zoutpakket wijst op mogelijk geresedimenteerd zout. De kalium-magnesium zouten zijn gevormd tijdens de hoogste zoutconcentratie van de aanwezige pekkel in het bekken. De aanwezige mineralen en de grote regionale verbreiding van deze zouten wijzen op het niet geheel droogvallen van het bekken.

De derde, grote transgressie luidde een nieuwe evaporiet-cyclus in. De reconstructie van het sedimentatieverloop van zowel de Zechstein 3 Formatie als de jongere Zechstein formaties wordt bemoeilijkt door het feit dat deze eenheden slechts in het Harlingen Subbekken (en plaatselijk op het Texel-IJsselmeer Hoog) bewaard zijn gebleven. De afwezigheid van kalium-magnesium zouten, binnen het kaartbladgebied, duidt erop dat de rand van het evaporietbekken zich verder naar het noorden had verlegd.

Na de transgressie van de vierde cyclus werden de Rode Zoutklei en Pegmatiet-Anhydriet onder voortdurende hypersaliene omstandigheden afgezet, zoals blijkt uit de afwezigheid van carbonaten in deze en hogere cycli. Aangenomen wordt dat de afzetting van de Zechstein 4 Formatie en de Boven-Zechstein plaats vond op een grote vlakte aan de rand van het bekken, onder playa-achtige omstandigheden.

5 Onder-Germaanse Trias Groep

5.1 Stratigrafie

De afzettingen van de Onder-Germaanse Trias Groep zijn in het gebied slechts door de Onder-Bontzandsteen Formatie vertegenwoordigd. De afzettingen bestaan uit een afwisseling van dunne zandsteen en kleisteen. De sedimenten zijn in een continentaal afzettingsmilieu afgezet.

De Onder-Germaanse Trias Groep ligt concordant op de Zechstein Groep (kaart 5) en wordt discordant bedekt door de Central Graben (Boven-Jura; kaart 15) en Rijnland Groep (Onder-Krijt; kaart 14). De ouderdom van de Onder-Germaanse Trias Groep is Vroeg-Trias (NAM & RGD, 1980).

De Onder-Germaanse Trias Groep is in het zuidoostelijk deel, het noordwestelijk deel en het westen van het kaartbladgebied aanwezig, met een gekarteerde maximale dikte van ruim 200 m (kaart 6).

5.1.1 Onder-Bontzandsteen Formatie

De Onder-Bontzandsteen Formatie is in het kaartbladgebied niet compleet. De formatie is opgebouwd uit de Basale Bontzandsteen en de Hoofdkleisteel Laagpakketten. Het Rogenstein Laagpakket is afwezig door erosie. De afzettingen worden gekenmerkt door een karakteristieke rode kleur.

Uit een sedimentologische studie van de Basale Bontzandsteen en de Hoofdkleisteel in Noordwest-Duitsland is gebleken, dat deze zijn opgebouwd uit 'fining-upward' cycli (Brüning, 1986). De door NAM & RGD (1980) gedefinieerde lithostratigrafische grens tussen deze laagpakketten blijkt echter midden in een dergelijke sedimentaire cyclustel liggen. Tevens omvat de Basale Bontzandsteen volgens de definitie van NAM & RGD (1980) de equivalenten van de hogere Zechstein cycli. In de onderhavige beschrijving worden de equivalenten van de hogere Zechstein cycli, informeel, apart genomen in de Boven-Zechstein (zie § 4.1.5 en figuur 4.8). De grenzen van de Basale Bontzandsteen zijn zodanig verlegd, dat hij overeenkomt met de onderste klastische cyclus van de Trias. De Basale Bontzandsteen komt volgens deze beschrijving goed overeen met de 'Obere Bröckelschiefer' in West-Duitsland (Best, 1989).

De *Basale Bontzandsteen* bestaat uit een basale fijnkorrelige zandsteen en een bovenliggend kleisteenpakket. Binnen het kaartbladgebied bereikt de eenheid een dikte van 10 tot 15 m. De basale zandsteen is met anhydriet gecementeerd. De kleisteen in de Basale Bontzandsteen onderscheidt zich door hogere gamma ray waarden en lagere akoestische snelheden goed van de kleisteen van de bovenliggende Hoofdkleisteel.

De *Hoofdkleisteel* is opgebouwd uit een cyclische opeenvolging van dunne zandsteenbanken en dikke kleisteenpakketten. De cyclische opbouw is op regionale schaal goed correleerbaar en de ontwikkeling in het gebied van het kaartblad laat zich bijzonder goed vergelijken met die in het noorden van Duitsland, zoals beschreven door Brüning (1986). De dikte en opbouw van de eerste drie cycli is in het noorden en noordwesten van Nederland zeer gelijkmatig (RGD 1989a). De Hoofdkleisteel bereikt binnen het kaartbladgebied een dikte van circa 190 m.

5.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Het gebied van dit kaartblad vormde tijdens de afzetting van de Onder-Bontzandsteen Formatie een uitgestrekt vlak terrein. Gezien het continentale afzettingsmilieu (Brüning, 1986; Paul, 1982) en de zeer goede correleerbaarheid van de individuele cycli van de Vroeg-Triassische afzettingen is het zeer aannemelijk dat de sedimentatie heeft plaatsgevonden in een zeer uitgestrekt meer. Dat dit meer soms droogviel blijkt uit de roodkleuring, veroorzaakt door oxidatie en herverdeling van, in het sediment aanwezige, ijzer onder invloed van een wisselende grondwaterspiegel en het aride klimaat (Walker, 1967).

De Basale Bontzandsteen representeert de laatste fase van opvulling van het sinds het Vroeg-Perm aanwezige reliëf. Uit de identieke ontwikkeling van de Hoofdkleistein ten noorden en ten zuiden van het Texel-IJsselmeer Hoog, blijkt dat dit hoog als tektonisch element gedurende de Vroeg-Trias geen rol meer speelde. Dit wijst op een uniforme daling, die vermoedelijk reeds tijdens het jongste Laat-Perm is aangevangen.

6 'Boven-Jura' Afzettingen

6.1 Stratigrafie

In tegenstelling tot de overige hoofdstukken worden hier twee lithostratigrafische groepen en een formatie onder de noemer 'Boven-Jura' beschreven. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat deze faciesgebonden groepen gelijktijdig zijn afgezet en lateraal in elkaar overgaan. Bovendien is een seismische differentiatie niet mogelijk. De gesteenten hebben een Midden-Jurassische tot oudste Vroeg-Krijt ouderdom.

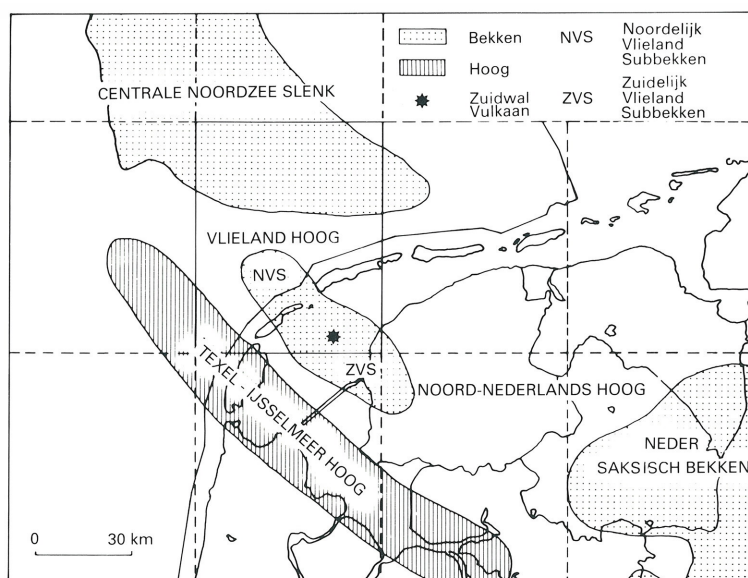
De binnen het kaartbladgebied voorkomende 'Boven-Jura' afzettingen zijn beperkt tot het Vlieland Bekken (kaart 7). Dit bekken wordt door de zogenaamde Zuidwal Volcanic Dome gescheiden in een noordelijk en een zuidelijk subbekken (fig. 6.1). De stratigrafie van deze 'Boven-Jura' afzettingen is relatief complex, en wijkt af van die in de nabijgelegen Centrale Noordzee Slenk (fig. 6.2).

In het noordelijk Vlieland Subbekken zijn mariene kleistenen en zandstenen aanwezig, die worden gerekend tot de Scruff Groep (NAM & RGD, 1980; Herengreen & Wong, 1989). Deze worden in dit subbekken bedekt door hoofdzakelijk continentale zandstenen, siltstenen en kleistenen van de Central Graben Groep. In het zuidelijk Vlieland Subbekken komen alleen continentale afzettingen voor van de Central Graben Groep. Rond de boring Zuidwal-1, in het zuiden van het kaartbladgebied, is een vulkanische breccie aanwezig, de Zuidwal Vulkaniet Formatie. Deze eenheid vormt een op zich zelf staande formatie, die niet tot enige groep wordt gerekend.

De Boven-Jura afzettingen liggen discordant op de Onder-Germaanse Trias, Zechstein, Boven-Rotliegend en Limburg Groepen (kaart 15). De afzettingen worden, gescheiden door een klein hiaat, concordant bedekt door de Rijnland Groep (kaart 14).

De 'Boven-Jura' afzettingen bereiken binnen het gebied van het kaartblad in het noordelijk subbekken een dikte van ruim 400 m (kaart 8), terwijl in het zuidelijk Vlieland Subbekken de dikte ruim 440 m bedraagt (fig. 6.3). Naar de randen van het bekken neemt de dikte van de 'Boven-Jura'

Figuur 6.1 Belangrijkste structurele elementen in het noorden van Nederland ten tijde van de Laat-Jura.



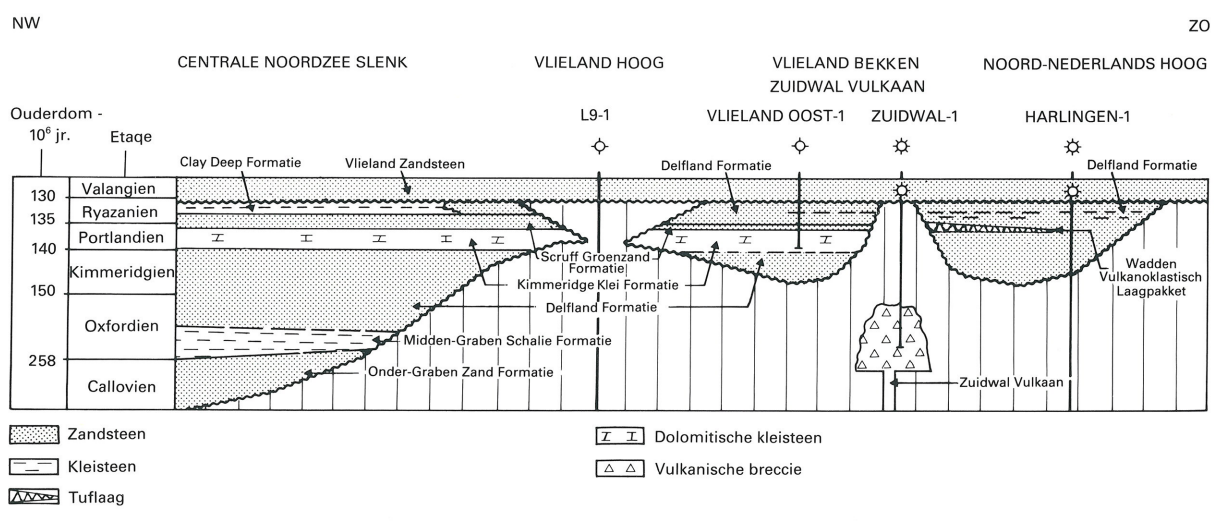
afzettingen snel af. De 'Boven-Jura' afzettingen ontbreken in de onmiddellijke omgeving buiten de grenzen van het Vlieland Bekken. Aangenomen wordt dat zij daar nimmer zijn afgezet. Ten noorden van het bekken, op het Vlieland Hoog, werd tijdens de Laat-Jura waarschijnlijk een dun pakket sedimenten afgezet. Zij ontbreken thans echter als gevolg van erosie.

6.1.1 Zuidwal Vulkaniet Formatie

De Zuidwal Vulkaniet Formatie (Herngreen et al., in druk) is alleen aangeboord in boring Zuidwal-1 (fig. 6.2, 6.5). Het gesteente bestaat uit een breccie van grijs, donkerbruin of groen gekleurde, zeer hoekige, 0.5 tot 5 cm grote componenten en een roze tot lichtbruin gekleurde matrix van zandige tot siltige, sterk gelithificeerde vulkanische as. De in hoge mate chemisch verweerde componenten van de breccie hebben een basaltische–phonolitische, leucitische en trachytische – samenstelling (Dixon et al., 1981). Op grond van sporenelementen worden de componenten van de breccie gerekend tot 'alkaline intra-plate' vulkanische gesteenten (Perrot & Van der Poel, 1987).

In de boring Zuidwal-1 werd ruim 1050 m vulkanische breccie doorboord. Hieruit wordt geconcludeerd dat de pijp van de voormalige Zuidwal vulkaan is aangeboord (fig. 6.5). De Zuidwal Vulkaniet Formatie wordt in de boring Zuidwal-1 discordant bedekt door afzettingen van de Rijnland Groep. In het oostelijk verbreidingsgebied van de vulkanische breccie wordt deze vermoedelijk discordant bedekt door afzettingen van de Central Graben Groep (kaart 15).

Radiometrische dateringen van de vulkanische breccie variëren van laat Midden-Jura (Callovien) tot vroeg Laat-Jura (Oxfordien) ouderdom (Dixon et al., 1981; Perrot & Van der Poel, 1987; fig. 6.2).



Figuur 6.2 Ongeveer noordwest-zuid-oost georiënteerd lithostratigrafisch diagram van de 'Boven-Jura' afzettingen in het gebied van het Vlieland Bekken, het Vlieland Hoog en de

zuidelijke Centrale Noordzee Slenk (niet op schaal). Absolute ouderdommen (in miljoenen jaren, Ma) volgens Kennedy & Odin (1982). De ouderdom van de Zuidwal Vulkaniet Formatie

volgens Dixon et al. (1981) en Perrot & Van der Poel (1987). Aangepast naar Herngreen & Wong (1989) en Herngreen et al. (in druk).

6.1.2 Central Graben Groep

Van de Central Graben Groep wordt binnen het kaartbladgebied de Delfland Formatie onderscheiden. Deze formatie komt voor in het Vlieland Bekken (fig. 6.2, 6.4). In het zuidelijk subbekken ligt de formatie discordant op de Onder-Germaanse Trias en Zechstein Groepen, terwijl de formatie in het noordelijk subbekken concordant op de Scruff Groep ligt. In de nabijheid van de Zuidwal Vulkaan ligt de formatie discordant op de Zechstein, Boven-Rotliegend en Limburg Groepen. De Delfland Formatie wordt concordant bedekt door de Rijnland Groep (kaart 15).

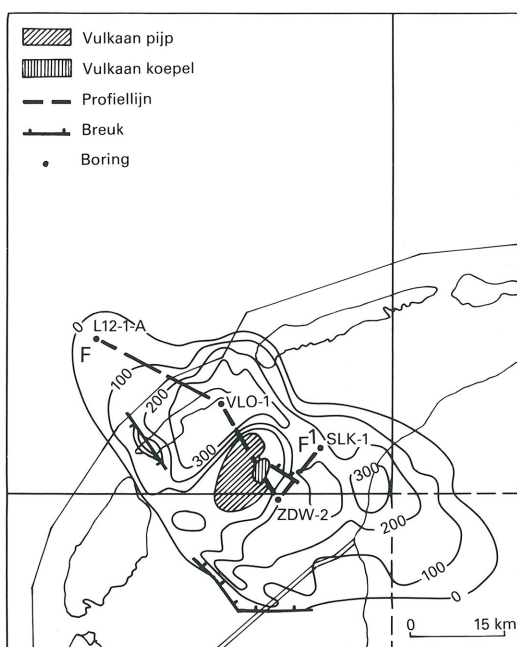
6.1.2.1 Delfland Formatie

De Delfland Formatie (NAM & RGD, 1980; Herngreen & Wong, 1989) bestaat uit een afwisseling van licht- tot donkerbruin gekleurde zandstenen en grijze, groene, of bruine, soms rood gevlekte silt- en kleistenen. Het bovenste deel van de formatie bevat veel plantenhaksel en enkele kool- en kalksteenbanken. In beide subbekkens komen ingeschakeld in de Delfland Formatie klastische afzettingen voor van vulkanische oorsprong, die worden gerekend tot het Wadden Vulkanoklastisch Laagpakket (fig. 6.2, 6.4).

Het afzettingsmilieu van de sedimenten van de Delfland Formatie is overwegend fluviatiel/lacustrien. In de bovengenoemde kalksteenbankjes komt echter een brakwater tot mariene ostracodenfauna voor. Ook palynologische gegevens wijzen er op dat de Delfland Formatie in beide subbekkens, zij het in het zuidelijk subbekken slechts in zeer geringe mate, mariene invloeden heeft gekend.

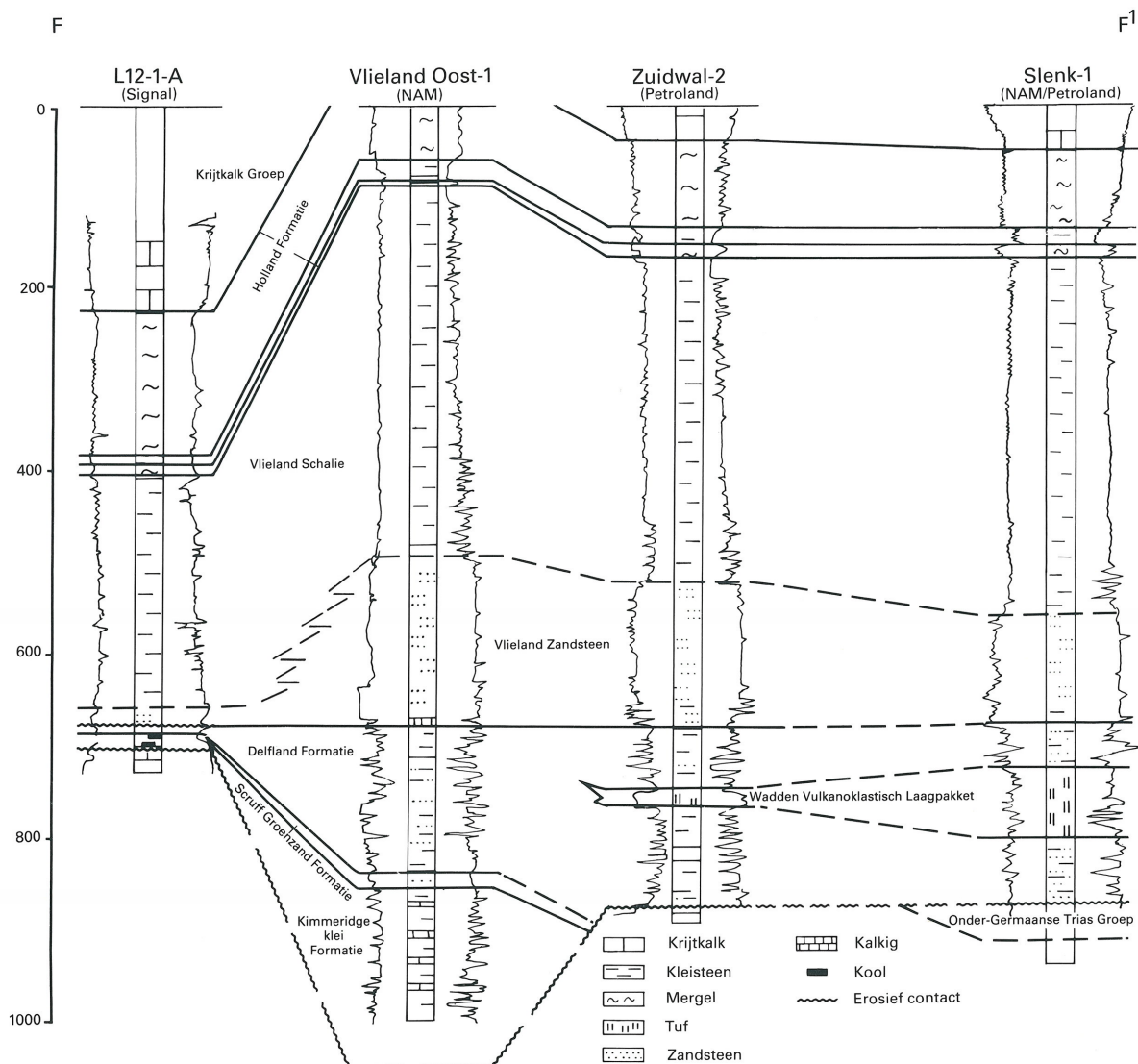
Palynologisch onderzoek toonde aan dat de Delfland Formatie in het Vlieland Bekken van Laat-Kimmeridgien tot Ryazanien ouderdom is (Herngreen et al., in druk). Op grond van die

Figuur 6.3 Isopachenkaart (contourinterval 100 m) van de 'Boven-Jura' sedimenten in het Vlieland Bekken. De kaart is gebaseerd op seismische- en boorgegevens. De lokatie van het stratigrafisch correlatieprofiel F-F' is weergegeven.



ouderdom wordt ook opgemerkt dat de jongste afzettingen van deze formatie in het noordelijk Vlieland Subbekken vermoedelijk het laterale, continentale equivalent zijn van de mariene kleien van de Clay Deep Formatie (Scruff Groep), welke verder naar het noorden in de Centrale Noordzee Slenk worden gevonden.

De grootst waargenomen dikte van de Delfland Formatie komt voor in de direct ten zuiden van het kaartbladgebied gelegen boring Harlingen West-1 (ruim 440 m; fig. 6.3). In het noordelijk Vlieland Subbekken bedraagt de grootste dikte van de Delfland Formatie die voorkomt bóven de Scruff Groep ongeveer 150 m (fig. 6.4). Op grond van de totale dikte van de Boven-Jura (Kaart 8) wordt aangenomen dat deze eenheid daar tevens ónder de Scruff Groep voorkomt. De dikte



Figuur 6.4 Stratigrafisch correlatie-profiel F-F', met de basis van de Rijnland Groep (basis Vlieland Zandsteen)

als referentieniveau. Voor de lokatie van sectie F-F' zie figuur 6.3.

van de Delfland Formatie onder de Scruff Groep wordt geschat op 50 m in het centrum van het subbekken. Naar de randen van het bekken neemt de dikte snel af.

Het *Wadden Vulkanoklastisch Laagpakket* (Herngreen et al., in druk) bestaat uit fijne tot grove, hoekige, ondoorschijnende, groene, rode en bruine klasten, in een grijze, tufachtige matrix. Deze afzettingen worden geïnterpreteerd als erosieproducten van lava's, waaruit de Zuidwal vulkaan opgebouwd moet zijn geweest. Zij komen in meerdere lagen voor, ingebed in afzettingen van de Delfland Formatie in de directe omgeving van de Zuidwal Volcanic Dome (fig. 6.4). De dikte van de afzonderlijke lagen bedraagt slechts enkele tientallen centimeters. Wanneer meerdere lagen voorkomen, afgewisseld met zand- en kleistenen, wordt een totale dikte bereikt van 78 m (Slenk-1; fig. 6.4).

Palynologische dateringen van deze eenheid geven een Portlandien ouderdom in de boring Slenk-1. Het aanmerkelijke verschil in ouderdom van de vulkaanpijp en de Delfland Formatie maakt het aannemelijk dat hernieuwde activiteit van de Zuidwal vulkaan is opgetreden.

6.1.3 Scruff Groep

De kleistenen van de Scruff Groep worden gerekend tot de Kimmeridge Klei Formatie, terwijl de zandstenen aan de top van de groep mogelijk behoren tot de Scruff Groenzand Formatie. De afzettingen van de Scruff Groep zijn in een marien milieu afgezet en vormen een regressieve sequentie. De Scruff Groep ligt in het noordelijke Vlieland Subbekken vermoedelijk ingeschakeld in de Delfland Formatie (fig. 6.2). Dit is een stratigrafische opeenvolging die afwijkt van die in Centrale Noordzee Slenk, waar de Scruff Groep op de Central Graben Groep is afgezet. In het centrum van het noordelijk subbekken wordt de dikte van de Scruff Groep op grond van seismische gegevens geschat op ongeveer 200 m.

6.1.3.1 Kimmeridge Klei Formatie

De Kimmeridge Klei Formatie (NAM & RGD, 1980; Herngreen & Wong, 1989) bestaat uit licht- tot donkergrijze kleisteen, waarin inschakelingen voorkomen van dunne kalksteen- en dolomietbanken. In boring Vlieland Oost-1 is de Kimmeridge Klei Formatie aan de top iets zandiger. Uit studies van wandkernen, afkomstig van de boring Vlieland Oost-1, is gebleken dat sedimentatie heeft plaatsgevonden in een vrij diep, open marien milieu onder de golfbasis. De aanwezige dolomietbanken wijzen er overigens op dat er vermoedelijk ook korte perioden zijn geweest waarin van een meer afgesloten marien milieu sprake is geweest.

Op de Kimmeridge Klei Formatie volgen afzettingen van vermoedelijk de Scruff Groenzand Formatie. De ouderdom van de Kimmeridge Klei Formatie in Vlieland Oost-1 is Portlandien (Herngreen et al., in druk). Uit deze datering, op palynologisch onderzoek gebaseerd, blijkt dat de top van deze formatie in het noordelijk Vlieland Subbekken iets jonger is dan de Kimmeridge Klei Formatie in het zuidelijke deel van de Centrale Noordzee Slenk.

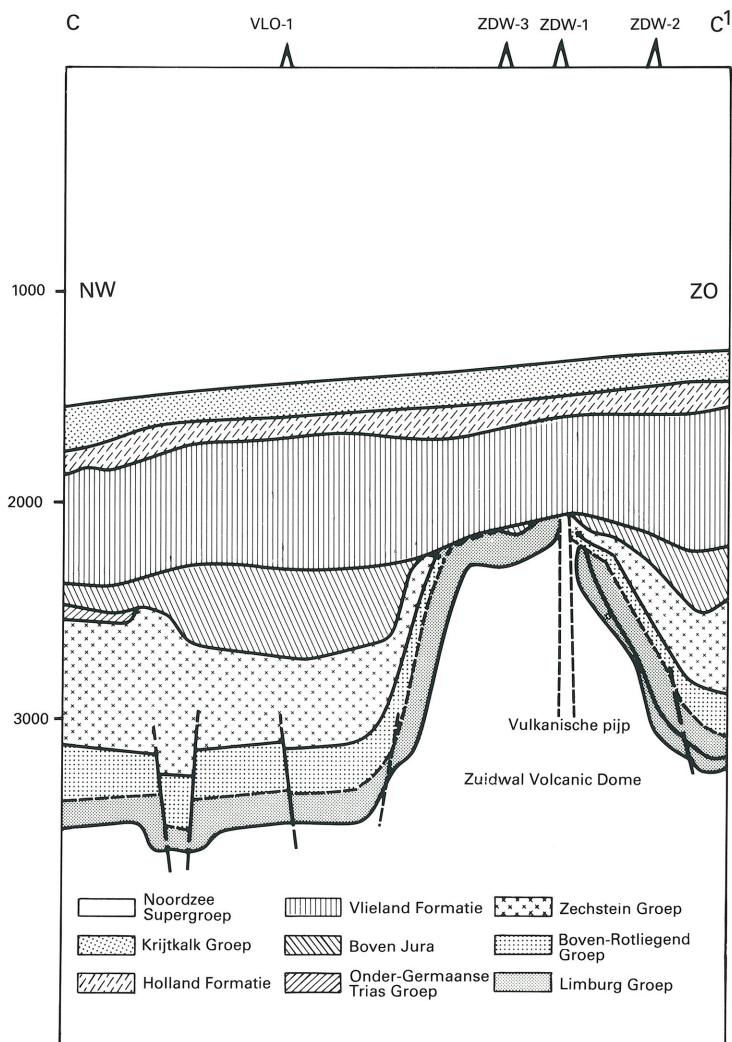
Op basis van een combinatie van seismische gegevens en boorgegevens wordt de grootste dikte van de Kimmeridge Klei Formatie in het centrum van het noordelijk Vlieland Subbekken geschat op ongeveer 175 m. Hiervan is ruim 140 m doorboord in boring Vlieland Oost-1 (fig. 6.4). De formatie wordt in de richting van de randen van het noordelijk subbekken dunner. Naar het zuiden wigt de formatie uit tegen de Zuidwal Volcanic Dome. De Kimmeridge Klei Formatie gaat in zuidoostelijke richting lateraal over in de Delfland Formatie (fig. 6.2, 6.4).

6.1.3.2 Scruff Groenzand Formatie

In de boring Vlieland Oost-1 in het noordelijk subbekken komt direct op de Kimmeridge Klei Formatie een zandsteenpakket voor, dat mogelijk op grond van sponsnaalden en glauconiet, tot de Scruff Groenzand Formatie gerekend kan worden. Er zijn echter ook aanwijzingen, zoals een koollaag en een terrestrisch/deltaïsche facies (RGD 1990a) dat een deel van het pakket tot de Delfland Formatie gerekend zou kunnen worden.

Verschillende niveaus in deze grijsbruin tot groenbruin gekleurde zandstenen zijn rijk aan glauconiet en sponsnaalden. Deze componenten zijn karakteristiek voor de Scruff Groenzand Formatie in de Centrale Noordzee Slenk, en zijn aanwijzingen voor een marien afzettingsmilieu. Het basale gedeelte van de Scruff Groenzand Formatie bevat dinocyst-associaties, waarvan de samenstelling er op wijst dat deze mogelijk zijn geremanieerd uit de onderliggende Kimmeridge Klei Formatie (RGD 1990a). De overgangen tussen de Scruff Groenzand Formatie en de er respectievelijk onder- en bovenliggende Kimmeridge Klei en Delfland Formaties zijn geleidelijk. Op grond van haar stratigrafische positie wordt aangenomen dat de Scruff Groenzand Formatie

Figuur 6.5 Profiel over de Zuidwal Volcanic Dome. Het profiel is gebaseerd op seismische en boorgegevens.



van Laat-Portlandien ouderdom is (fig. 6.2). De dikte van deze formatie bedraagt in boring Vlieland Oost-1 ongeveer 25 m (fig. 6.4).

6.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

Het Vlieland Bekken werd, gedurende het Kimmeridgien van de omringende mariene bekkens gescheiden door het Noord-Nederlands Hoog, het Texel-IJsselmeer Hoog en het Vlieland Hoog (fig. 6.1). In deze periode werden in het gehele Vlieland Bekken continentale sedimenten van de Delfland Formatie afgezet. De sedimenten zijn erosie-produkten van bovengenoemde hogen.

Tijdens het Portlandien had een transgressie vanuit de Centrale Noordzee Slenk het Vlieland Hoog overspoeld en zodoende het noordelijk Vlieland Subbekken bereikt. In dit noordelijk subbekken werd onder mariene omstandigheden de Kimmeridge Klei Formatie afgezet terwijl in het zuidelijk subbekken de continentale omstandigheden prevaleerden. Daar werden de jongste sedimenten van de Delfland Formatie afgezet. Deze facies overgang wordt verklaard door de aanwezigheid van de Zuidwal Volcanic Dome die het zuidelijk Vlieland Subbekken vrij effectief heeft afgeschermd tegen de mariene ingressies uit het noorden. De opvulling van het noordelijk Vlieland Bekken, in combinatie met een eustatische zeespiegeldaling (Vail & Todd, 1981; Haq et al., 1987), leidde tot een regressieve sequentie en de afzetting van de Scruff Groenzand Formatie.

Na de afzetting van de Scruff Groenzand Formatie werd het noordelijk Vlieland Subbekken opnieuw voor een langere tijd afgesloten van mariene invloeden, en vond in beide subbekkens afzetting van de Delfland Formatie plaats in een fluviatiel en lacustrien milieu. Afbraakprodukten van de Zuidwal vulkaan werden in de directe omgeving van de vulkaan in beide subbekkens afgezet, waar zij ingeschakeld voorkomen in de afzettingen van de Delfland Formatie. Slechte drainage van het Vlieland Bekken heeft aanleiding gegeven tot het ontstaan van veen, dat later verdere inkoling onderging.

6.3 Petrofysische evaluatie

Van een aantal boringen uit het studiegebied werd de bovenste zandsteeneenheid van de Delfland Formatie petrofysisch geëvalueerd. Dit omdat deze eenheid direct onder de gasvoerende zandstenen voorkomt aan de basis van de Rijnland Groep. Voor een samenvatting van de petrofysische gegevens wordt verwezen naar appendix E (RGD 1990c).

7 Rijnland Groep

7.1 Stratigrafie

De Rijnland Groep (NAM & RGD, 1980) bestaat uit een opeenvolging van grijsbruin tot groenig gekleurde zandstenen en grijs- tot bruinkleurige silt- en kleistenen en mergels. Deze sedimenten werden afgezet in een aanvankelijk ondiep, maar geleidelijk aan dieper wordend, open marien milieu. De ouderdom van de Rijnland Groep is Vroeg-Krijt.

In het Vlieland Bekken ligt de Rijnland Groep met een gering hiaat concordant op afzettingen van de 'Boven-Jura'. Buiten het Vlieland Bekken ligt deze groep discordant op de Onder-Germaanse Trias, Zechstein, de Boven-Rotliegend en de Limburg Groepen (kaart 14). De Rijnland Groep wordt concordant bedekt door afzettingen van de Krijtkalk Groep.

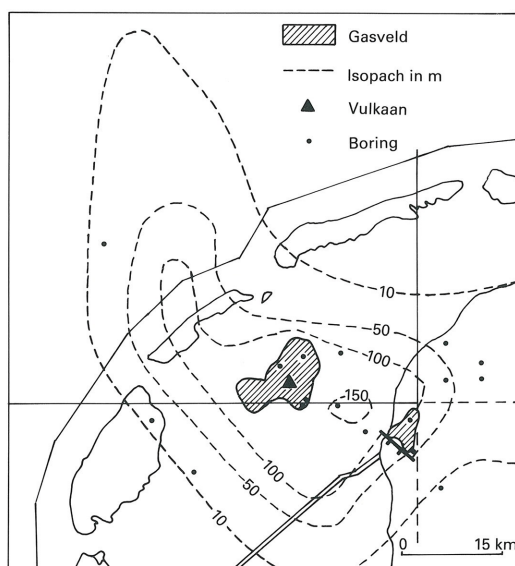
Afzettingen van de Rijnland Groep komen in het gehele kaartbladgebied voor. Dikten van de Rijnland Groep van meer dan 750 m komen voor in het noordelijk en het zuidelijk Vlieland Subbekken (kaart 10). De dikte van de Rijnland Groep neemt vanuit deze depocentra in zowel zuidwestelijke als in noordoostelijke richting af tot minder dan 200 m. De zandstenen aan de basis van de Rijnland Groep kunnen in dit gebied winbare hoeveelheden aardgas bevatten en zijn daarom economisch van belang.

De type-sectie van de Rijnland Groep is aanwezig in boring Vlieland Oost-1 (NAM & RGD, 1980; fig. 6.4). De Rijnland Groep wordt onderverdeeld in twee formaties; de Vlieland Formatie aan de basis gevolgd door de Holland Formatie.

7.1.1 Vlieland Formatie

De Vlieland Formatie (NAM & RGD, 1980) bestaat uit de basale Vlieland Zandsteen en het hierop liggende Vlieland Schalie Laagpakket. In de definitie van de Vlieland Zandsteen s.l. wijkt de toelichting af van NAM & RGD (1980), waar slechts het onderste zandpakket Vlieland Zandsteen s.s. wordt benoemd. Tot deze ruimere definitie van de Vlieland Zandsteen s.l. is besloten op

Figuur 7.1 Vereenvoudigde isopachenkaart van de Vlieland Zandsteen (gebaseerd op boorgegevens).



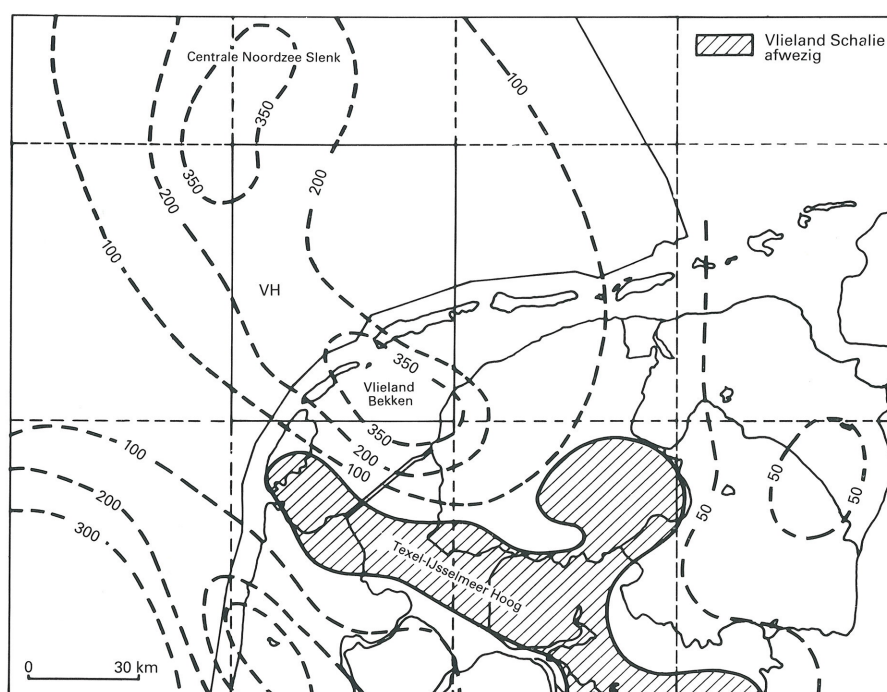
grond van de correlatie van de reservoir zandsteen van het Zuidwal gasveld (fig. 7.4) en op grond van sedimentologische studie. Door deze definitie omvat de Vlieland Schalie slechts silt- en kleisteen. De Vlieland Formatie werd aanvankelijk afgezet in een ondiep open marien milieu, dat in de loop der tijd dieper werd. De ouderdom van de formatie is Laat-Ryazanien tot en met Barremien.

Omdat de Vlieland Formatie de onderste formatie is van de Rijnland Groep, komt de afgedekte kaart van de basis van de groep overeen met die van de formatie (kaart 14). De formatie wordt, gescheiden door een hiaat, bedekt door afzettingen van de Holland Formatie.

De Vlieland Formatie komt in het gehele gebied voor. De dikte van de formatie varieert van meer dan 650 m in het centrum, tot 200 m in het noordwestelijk deel van het kaartbladgebied.

De *Vlieland Zandsteen* s.l. bestaat uit een afwisseling van veelal goedgelaagde, weinig gelithificeerde, grijsbruin- tot groenkleurige, fijne tot middelfijne kwartzandstenen, donkerkleurige siltstenen en siltige kleistenen. De zandstenen vertonen in het algemeen interne scheve gelaagdheid. Als gevolg van intensieve bioturbatie komen ook structuurloze zandstenen voor. De zandstenen gaan naar boven toe veelal geleidelijk over in silt- en kleistenen. De siltige en kleiige intervallen zijn vaak gelamineerd en rijk aan organisch materiaal. Ook het omgekeerde komt voor, waarbij silt- en kleistenen naar boven toe geleidelijk overgaan in zandstenen. Ingeschakeld in deze gegradueerde sequenties komen lagen voor van bruinkleurige zandstenen, welke zijn gecementeerd met calciet en sideriet. De Vlieland Zandsteen s.l. werd afgezet in een ondiep marien milieu. De sterk gebioturbeerde zanden werden kustnabij afgezet, de grove slecht gesorteerde zanden reflecteren afzetting in een oeverfront facies. De overgang van de Vlieland Zandsteen s.l. naar de Vlieland Schalie is vrij abrupt en is goed herkenbaar op gamma ray en sonic logs (fig. 6.4). De ouderdom van de Vlieland Zandsteen is Laat-Ryazanien tot en met Vroeg-Valanginien (Herngreen et al., in druk).

Figuur 7.2 Vereenvoudigde isopachenkaart van de Vlieland Schalie. De kaart is gebaseerd op zowel boorgegevens als op seismische informatie. VH is Vlieland Hoog.



De in boringen waargenomen dikte van de Vlieland Zandsteen varieert van meer dan 150 m in het zuidelijk Vlieland Subbekken, in het zuiden van het kaartbladgebied, tot minder dan 10 m buiten de grenzen van het Vlieland Bekken (fig. 7.1).

De *Vlieland Schalie* (NAM & RGD, 1980) is de bovenste eenheid van de Vlieland Formatie. Het laagpakket bestaat uit donkerbruine tot donkergrijze, siltige kleisteen. Aan de top van de eenheid is de kleisteen enigszins mergelig. De Vlieland Schalie werd afgezet in een aanvankelijk ondiep, maar geleidelijk aan dieper wordend, open marien milieu. De Vlieland Schalie heeft een ouderdom van Laat-Valanginien tot en met Barremien.

De Vlieland Schalie komt in het gehele gebied van het kaartblad voor. De dikte van dit laagpakket varieert van 350 m in de boring Vlieland Oost-1 tot minder dan 200 m buiten de grenzen van het Vlieland Bekken (fig. 7.2). De relatief dikke kleisteenafzettingen van de Vlieland Schalie vormen een effectieve afsluiting van het Vlieland Zandsteen reservoirgesteente van het Zuidwal gasveld.

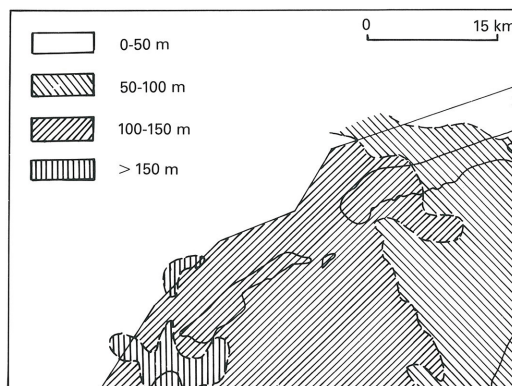
7.1.2 Holland Formatie

De Holland Formatie (NAM & RGD, 1980) is de bovenste eenheid van de Rijnland Groep. De formatie bestaat uit opeenvolgend licht- tot donkergrijze, soms bont gekleurde mergelige kleisteen, donkergrijze kleistenen en lichtgrijze mergelige kleisteen. De sedimenten van de Holland Formatie werden in een wisselend ondiep tot vrij diep marien milieu afgezet. De afzettingen van de Holland Formatie zijn van Laat-Aptien en Albien ouderdom.

De Holland Formatie ligt met een hiaat op de Vlieland Formatie. Het hiaat omvat vrijwel het volledige Vroeg-Aptien (Herngreen et al., in druk). De Holland Formatie wordt concordant bedekt door afzettingen van de Krijt-kalk Groep. De formatie komt in het gehele kaartbladgebied voor. De dikte van de formatie varieert sterk, van minder dan 50 m in het noordoosten van het kaartbladgebied tot meer dan 150 m in het zuidwesten (fig. 7.3).

De Holland Formatie wordt onderverdeeld in de Onder-Holland Mergel, de Midden-Holland Schalie en de Boven-Holland Mergel Laagpakketten, een driedeling die in de diepe ondergrond van vrijwel geheel Nederland wordt herkend (fig. 6.5). De laagpakketten kunnen op grond van boorgatmetingen goed van elkaar onderscheiden worden.

Figuur 7.3 Vereenvoudigde isopachenkaart van de Holland Formatie. De kaart is gebaseerd op seismische informatie.



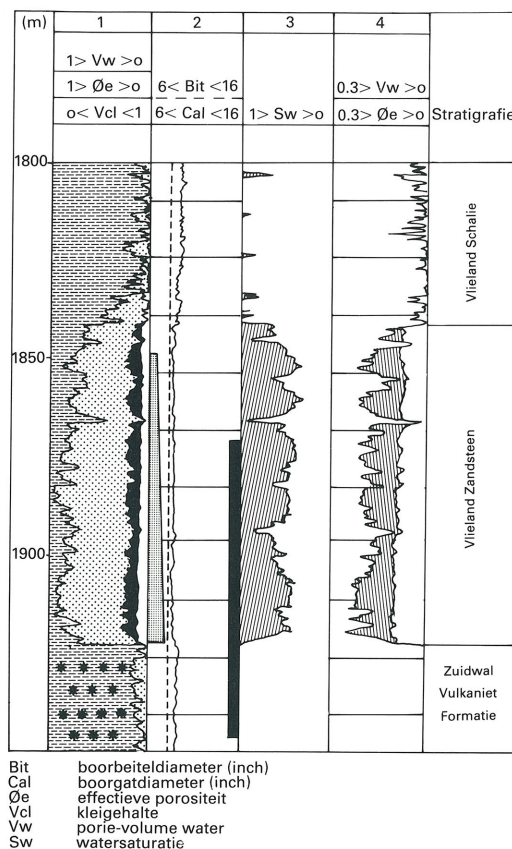
De *Onder-Holland Mergel* (NAM & RGD, 1980) bestaat uit een licht- tot donkergrijs, soms rood, bruin of gelig gekleurde mergelige kleisteen. Het afzettingsmilieu van de Onder-Holland Mergel is relatief ondiep, open marien. De ouderdom van de Onder-Holland Mergel is Laat-Aptien tot het vroegste Vroeg-Albien.

De Onder-Holland Mergel bedekt de Vlieland Schalie, gescheiden door een belangrijk hiaat met een regionale betekenis. Dit hiaat omvat vrijwel het volledige Vroeg-Aptien. Ook tussen de Onder-Holland Mergel en de Midden-Holland Schalie ligt een hiaat. De dikte van deze eenheid varieert van 5 m in het centrum, tot 15 m in het zuiden en zuidwesten van het kaartbladgebied.

De *Midden-Holland Schalie* (NAM & RGD, 1980) bestaat uit donkergrijze kleisteen met aan de basis een zandig karakter. Het afzettingsmilieu van de Midden-Holland Mergel is open marien. De ouderdom van de Midden-Holland Schalie is van laat Vroeg-Albien tot en met Midden-Albien.

De Midden-Holland Schalie ligt gescheiden door een hiaat op de Onder-Holland Mergel. Het hiaat tussen deze eenheden omvat een deel van het Vroeg-Albien. In het zuidoosten van het kaartbladgebied is dit hiaat vermoedelijk iets groter en omvat daar ook een deel van het vroeg Midden-Albien (Herngreen et al., in druk). Het contact met de Boven-Holland Mergel is concordant. De grootste dikte wordt in het centrum en in het zuidwesten van het kaartbladgebied gevonden (20 m in Vlieland Oost-1; fig. 6.5). In het noorden en noordoosten van het kaartbladgebied bedraagt de dikte van deze eenheid slechts enkele meters.

Figuur 7.4 Petrofysische evaluatie van het Vlieland Zandsteen traject in de boring Zuidwal-1. Voor de verklaring van de kolommen 1 en 2, en de gebruikte symbolen, zie figuur 3.9. Bovendien zijn geteste (appendix G) en gekernde intervallen aangegeven. In kolom 3 de watersaturatie S_w . In kolom 4 de effectieve porositeit ϕ_e en het volume water in de poriën (V_w). Omdat de Vlieland Zandsteen plaatselijk 5 tot 10% glauconiet bevat, kan de gamma ray log niet als klei-indicator dienen. Het kleigehalte (Vcl) werd bepaald m.b.v. de density-sonic klei-indicator. De effectieve porositeit werd verkregen uit de sonic (density) porositeit (Wyllie-vergelijking in single porosity model; Wyllie et al., 1956, Wyllie et al., 1958) na correctie voor het kleigehalte en het koolwaterstofgehalte. Voor de bepaling van de watersaturatie werd de Indonesia-formule toegepast, die geschikt is voor kleiige formaties (Fertl, 1987). Diepten zijn werkelijke diepten.



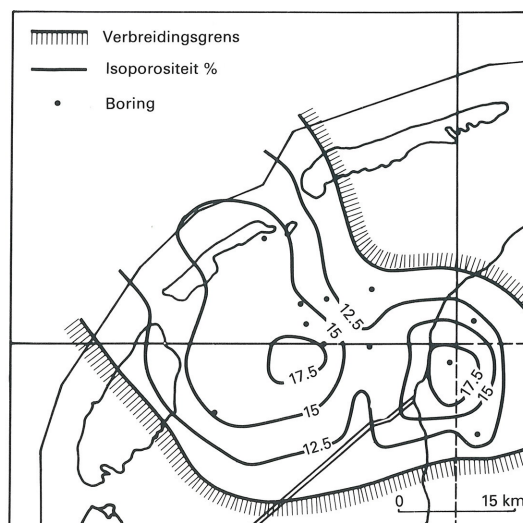
De *Boven-Holland Mergel* (NAM & RGD, 1980) bestaat uit lichtgrijze, mergelige kleisteen. Het afzettingsmilieu van de Boven-Holland Mergel is open marien. De ouderdom van de Boven-Holland Mergel is Laat-Albien. Alhoewel zij van te korte duur zijn om biostratigrafisch te kunnen worden aangetoond, komen er in de Boven-Holland Mergel vermoedelijk meerdere hiaten voor (Herngreen et al., in druk). Het contact met zowel de Midden-Holland Schalie als met de bovenliggende Krijtkalk Groep is concordant. De dikte van deze eenheid varieert van meer dan 100 m in het zuidwesten, tot ongeveer 30 m in het noordoosten van het kaartbladgebied.

7.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De continentale fase van de 'Boven-Jura' afzettingen werd, als gevolg van een stijging van de zeespiegel tijdens het Laat-Ryazanien, beëindigd met een vanuit het noorden binnendringende transgressie. In de beginfase van deze transgressie werden de zanden aan de basis van de Vlieland Formatie afgezet in een ondiep-marien milieu. De depocentra van de Vlieland Zandsteen werden hoofdzakelijk nog bepaald door de configuratie van het noordelijk en het zuidelijk Vlieland Subbekken. De regionale spreiding van de Vlieland Zandsteen toont aan dat de oorspronkelijke Laat-Jurassische grenzen van het Vlieland Bekken reeds tijdens de afzetting van de Vlieland Zandsteen werden overschreden (fig. 7.1).

Als gevolg van de aanhoudende stijging van de zeespiegel vond meer fijnklastische sedimentatie plaats en werd de Vlieland Schalie afgezet. Palynofacies-analyses wijzen er op dat gedurende deze periode vermoedelijk ook fluctuaties in de waterdiepte zijn voorgekomen. (Herngreen et al., in druk). De verdeling van de Vlieland Schalie werd binnen het kaartbladgebied in beginsel nog bepaald door het Vlieland Bekken. Over het tussenliggend Vlieland Hoog stond het Vlieland Bekken in verbinding met het zuidelijk deel van de Centrale Noordzee Slenk (fig. 7.2). De aanvoer van klastische sedimenten nam in de loop van het Barremien geleidelijk af, en er werden meer mergelige kleistenen afgezet, waarbij het kalkige bestanddeel voornamelijk afkomstig was van planktonische organismen.

Figuur 7.5 Schematische contourkaart van de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit ϕ_{em} van de Vlieland Zandsteen (appendix F). De grenzen van het Vlieland Bekken ten tijde van de afzetting van de Vlieland Zandsteen zijn aangegeven. Het kader geeft de grenzen aan van het kaartbladgebied.



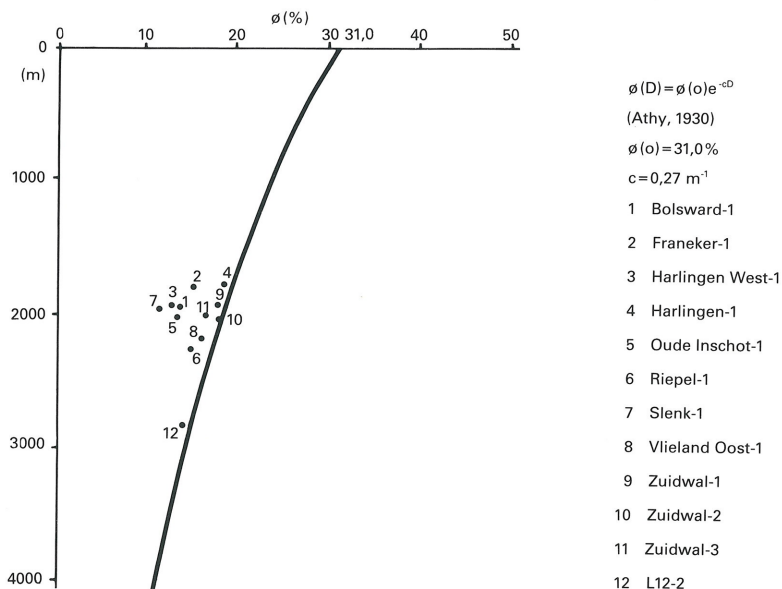
Ook tijdens het Aptien en Albien vond sedimentatie in een marien milieu plaats. Paleontologische en sedimentologische gegevens wijzen op verschillende perioden van kortstondige stilstand in sedimentatie, kleine tektonische bewegingen en transgressies en regressies (Crittenden, 1987; RGD 1990a). Het toegenomen mergelige karakter van de Onder-Holland Mergel afzettingen, vergeleken met die van de Vlieland Schalie, betekent vermoedelijk een verder terugdringen van de brongebieden van klastische sedimenten, als gevolg van een zich verder naar het zuiden uitbreidende transgressie. Het zandige karakter van de basis van de Midden-Holland schalie reflecteert de Albien transgressie (NAM & RGD, 1980; Crittenden, 1987). Tijdens de afzetting van de Holland Formatie heeft het Vlieland Bekken geen invloed meer op de dikteverdeling (vergelijk figuren 7.1 en 7.3).

7.3 Petrofysische evaluatie

De Vlieland Zandsteen van tien boringen uit het kaartbladgebied en directe omgeving werd petrofysisch geëvalueerd (appendix F; RGD 1990c). In drie van deze boringen is de Vlieland Zandsteen gasvoerend (appendix G). Als voorbeeld van een logevaluatie van de Vlieland Zandsteen wordt in figuur 7.4 het resultaat getoond voor de boring Zuidwal-1. In figuur 7.5 is schematisch de verdeling van de gemiddelde effectieve porositeit van de Vlieland Zandsteen in het gebied van het kaartblad weergegeven. Uit het kaartbeeld van deze verdeling blijkt dat de gemiddelde effectieve porositeit naar de randen van de subbekkens toe afneemt.

De porositeitsreductie van de Vlieland Zandsteen is niet alleen veroorzaakt door compactie, maar ook door cementatie (fig. 7.6). Als cement zijn calciëet en sideriet aanwezig. Bij de vermindering van de porositeit hebben vooral vroeg-diagenetische processen, zoals de neerslag van calciëet, een rol gespeeld. Voor de permeabiliteit is van belang dat illiet 10% van de kleimineralen uitmaakt (Perrot & Van der Poel, 1987). Het ontstaan van illietfibers heeft namelijk reductie van de permeabiliteit tot gevolg (Seemann, 1979; Pallatt et al., 1984).

Figuur 7.6 Porositeit versus diepte plot voor de Vlieland Zandsteen: de compactiecurve volgens de exponentiële relatie van Athy (1930) met een oppervlakteporositeit voor zandsteen $\phi(0) = 31,0\%$. Voor de constante c werd de waarde $c = 0,27$ gehanteerd (Sclater & Christie, 1980). De datapunten vertegenwoordigen de reservoir-gemiddelde effectieve porositeit van de Vlieland Zandsteen (appendix F).



Cottençon et al. (1975) onderkennen op grond van lithologische kenmerken in het Zuidwal gasveld een vijftal reservoirzones, die zich door interne fining- en coarsening-upward sequenties van elkaar onderscheiden. Perrot & Van der Poel (1987) maakten naast deze lithologische indeling, op grond van gegevens van porositeit en permeabiliteit, een onderscheid naar goede en minder goede reservoirzones. De reservoir eigenschappen vertonen een regionale trend, waarbij voor iedere laag een verbetering wordt waargenomen van het noordwesten van het kaartbladgebied naar het zuidoosten. Aan de hand van kernstudies beschreven Perrot & Van der Poel (1987) een aantal permeabiliteitsbarrières van ca. 10 cm tot ca. 1 meter dikte, bestaande uit met sideriet en calciet gecementeerde zandsteenbanken. Deze zandsteenbanken verdelen de Vlieland Zandsteen in totaal 18 dunne eenheden. De gecementeerde zones staan alleen horizontale doorstroming toe van het gas in het reservoirgesteente. Sinds november 1988 produceert Elf Petroland B.V. aardgas uit het Zuidwal gasveld, dat een initiële reserve bevat van 26 miljard kubieke meters gas (Perrot & Van der Poel, 1987).

8 Krijtkalk Groep

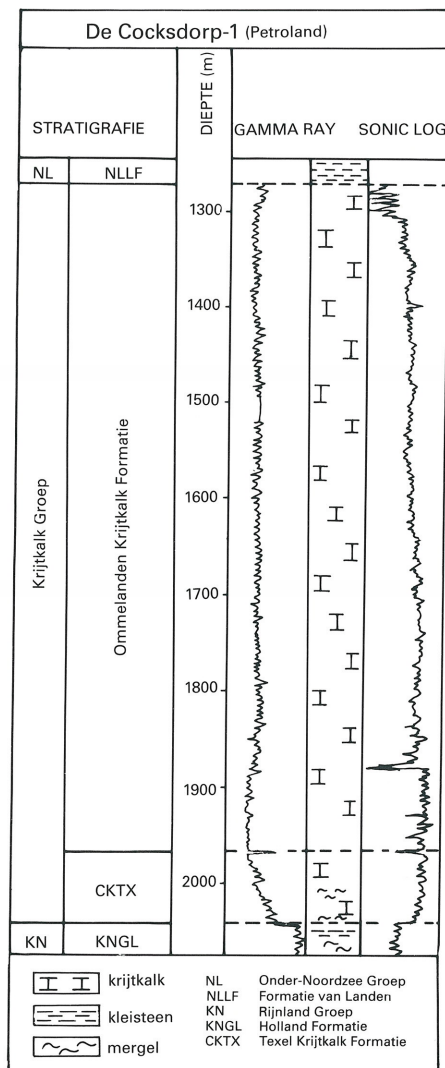
8.1 Stratigrafie

De Krijtkalk Groep bestaat uit een sequentie van goed gecementeerde, lichtgekleurde fijnkorrelige krijtkalken en mergelige kalken. Karakteristiek voor deze sedimenten is dat zij voornamelijk bestaan uit kalkskeletten van planktonische en benthonische organismen (coccolieten, foraminiferen, sponzen, bryozoën etc.), en een laag gehalte aan terrigeen materiaal (NAM & RGD, 1980).

De ondergrens van de Krijtkalk Groep wordt gelegd aan de basis van de kalksteen successie, die concordant op de mergels van de Rijnland Groep volgt. De top van de groep wordt gelegd waar de kalken discordant bedekt worden door de klastische sedimenten van de Onder-Noordzee Groep (NAM & RGD, 1980).

De Krijtkalk Groep wordt onderverdeeld in de Texel Krijtkalk Formatie en de Ommelanden Krijtkalk Formatie. Dit wordt in figuur 8.1 aan de hand van de boorgatmetingen van de boring De

Figuur 8.1 Opbouw van de Krijtkalk Groep in de boring De Cocksdrp-1 (Petroland).



Cocksdoorp-1 geïllustreerd. De grens tussen deze formaties wordt gelegd aan de top van de tot de Texel Krijtkalk behorende Plenus Mergel, een markante donkere schalierrijke mergellaag.

De afzettingen van de Krijtkalk Groep zijn van Laat-Krijt ouderdom (RGD 1989d). Ze komen in het gehele kaartbladgebied voor. De dikte varieert van 100 m tot 1400 m in het zuidwesten van het kaartbladgebied (kaart 12).

8.1.1 Texel Krijtkalk Formatie

De Texel Krijtkalk Formatie bestaat in het gebied van het kaartblad uit lichtgrijze krijtkalk en mergelige kalk met een aantal mergel inschakelingen met aan de top een markante, over grote afstanden te vervolgen, kleisteenlaag: de Plenus Mergel. Deze laag ontleent haar naam aan haar Engelse equivalent, een mergelbank waarin de belemniet *Actinocamax plenus* veelvuldig voorkomt. Binnen het kaartbladgebied bestaat de Plenus Mergel uit een slechts enkele meters dikke kleisteenlaag herkenbaar aan een opvallende piek op de gamma ray log (fig 8.1).

Binnen het kaartbladgebied is de samenstelling en opbouw van de Texel Krijtkalk uniform. De dikte varieert weinig en bedraagt 60 à 70 meter. De ouderdom van de Texel Krijtkalk is Cenomanien (RGD 1989d).

8.1.2 Ommelanden Krijtkalk Formatie

De Ommelanden Krijtkalk Formatie bestaat uit witte tot lichtgrijze krijtkalk, krijtachtige kalksteen en mergelige krijtkalk met enige mergel intercalaties. Voorts komen meerdere niveaus van laagparallel gerangschikte vuursteenconcreties voor.

De formatie wordt aan de basis begrensd door de Texel Krijtkalk Formatie. De top wordt discordant bedekt door de klastische afzettingen van het Tertiair. Op grond van biostratigrafische gegevens is de ouderdom van de formatie op Turonien tot en met Maastrichtien bepaald. Tevens is gebleken dat enkele intraformationele hiaten voorkomen (RGD 1989d). Een deel van deze hiaten is ook via logcorrelaties te bepalen (RGD 1988a).

Binnen het kaartbladgebied varieert de dikte van de formatie zeer sterk. Als gevolg van tektonische opheffing (inversie) van het Vlieland Bekken heeft erosie zich diep ingesneden in de afzettingen van de Ommelanden Krijtkalk. Boven de inversie-as van het Vlieland Bekken bedraagt de dikte ongeveer 25 m (Vlieland Oost-1), terwijl deze naar het zuidwesten toeneemt tot ruim 1000 m.

Het monotone karakter van de sequentie maakt verdere onderverdeling op regionale schaal zeer moeilijk. Voor lokale toepassingen zijn op grond van seismische gegevens en boorgatmetingen soms wel onderverdeling mogelijk (RGD 1988a; Baldschuhn & Jaritz, 1977).

8.2 Sedimentaire ontwikkeling en paleogeografie

De transgressie die tijdens het Albien was begonnen ontwikkelde zich in het Laat-Krijt tot een mondiaal fenomeen (Pitman, 1978; Donovan & Jones, 1979). Binnen het kaartbladgebied en omgeving werden de laatste landmassa's overspoeld. Het kaartbladgebied kwam zodoende in open zee te liggen, ver verwijderd van enige kust. Door het overspoelen van de brongebieden van klastische sedimenten bestaan de Laat-Krijt afzettingen voornamelijk uit bioklastische bestanddelen, dit in tegenstelling tot de Holland Formatie die nog is opgebouwd uit kleisteen en

mergels. De overgang tussen de twee formaties is geleidelijk en de sedimentatie was min of meer continu. Dit komt in de boorgatmetingen duidelijk tot uiting (fig. 8.1).

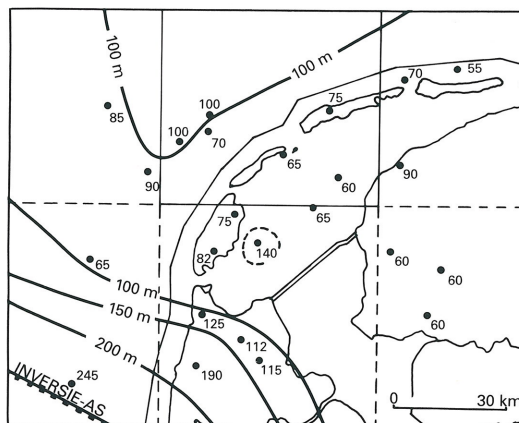
Aanvankelijk, tijdens de afzetting van de Texel en aan het begin van de Ommelanden Krijt-kalk (Cenomanien en Turonien), heerste een periode van tektonische rust. De binnen het kaartbladgebied aangeboorde trajecten laten een redelijk constante dikte zien. Buiten het kaartbladgebied neemt de dikte van deze afzettingen toe in de richting van het Mesozoïsche Centraal Nederlands Bekken (fig. 8.2). Na het Turonien echter werd, onder invloed van een compressief regime, het voormalige Vlieland Bekken opgeheven (geïnverteerd). Dit had belangrijke consequenties voor de afzetting en erosie van de Ommelanden Krijt-kalk Formatie. In het sterkst geïnverteerde deel van het Vlieland Bekken is de totale dikte van de Krijt-kalk Groep slechts 100 m, terwijl op het min of meer stabiele Noord-Nederlands Hoog in Friesland een pakket van gemiddeld 750 m is afgezet. Op het Texel-IJsselmeer Hoog en het direct aangrenzende deel van het Centraal Nederlands Bekken, dat tijdens de inversie een dalingsgebied was, is ruim 1000 m Ommelanden Krijt-kalk Formatie afgezet. Kaart 12 toont de totale dikte van de Krijt-kalk Groep. De dikte-variaties doen zich alleen voor in de Ommelanden Krijt-kalk Formatie.

Biostratigrafisch (o.a. boringen Oude Inschot-1 en Zuidwal-2; RGD 1985a; RGD 1989c) en seismostratigrafisch onderzoek hebben aangetoond dat de sedimentatie van de Ommelanden Krijt-kalk tijdens de inversie van het Vlieland Bekken een aantal malen kortstondig onderbroken of vertraagd is. Zodoende is er een gecondenseerde sequentie ontstaan met intraformationele hiaten waarbij de sedimenten van het Santonien en het Campanien duidelijk het minst dik ontwikkeld zijn. Dit impliceert dat tijdens die perioden de tektonische activiteit van de Subhercynische tektonische fase het krachtigst is geweest.

Het is aannemelijk dat de erosieproducten, afkomstig van de opgeheven gebieden, afgezet werden in dalingsgebieden. Met name de randtroggen, die de geïnverteerde bekkens flankeren zouden veel materiaal ontvangen hebben. De opheffing en erosie gekoppeld aan de Laramische tektonische fase hebben binnen het kaartbladgebied een betrekkelijk geringe invloed gehad. Het Maastrichtien is zodoende in een deel van het kaartbladgebied bewaard gebleven.

Het huidige dikteverloop van de afzettingen van de Krijt-kalk Groep (kaart 12) is voornamelijk structureel bepaald. De dikte van de afzettingen neemt loodrecht op de inversie-as van het Vlieland Bekken naar beide zijden af.

Figuur 8.2 Isopachenkaart Texel Formatie, gebaseerd op putgegevens. De dikte toename in de richting van het Centraal Nederlands Bekken laat een voortschrijdende daling van dit Juras-sische Bekken tijdens het begin van het Laat-Krijt zien.



9 Noordzee Supergroep

9.1 Stratigrafie

De Noordzee Supergroep (NAM & RGD, 1980) is opgebouwd uit kleien, met enkele zandige inschakelingen. De supergroep is onderverdeeld in de Onder-Noordzee, Midden-Noordzee en Boven-Noordzee Groep, welke van elkaar worden gescheiden door discordanties. De Noordzee Supergroep ligt discordant op de Krijtkalk Groep. De afzettingen van de Noordzee Supergroep hebben een Tertiaire en Kwartaire ouderdom. De beschrijving van deze afzettingen is hoofdzakelijk gebaseerd op rapporten van de Rijks Geologische Dienst (RGD, 1984a, 1984b). Kwartaire sedimenten worden slechts kort genoemd; deze komen uitgebreid aan de orde in de toelichting bij de 1:50.000 kartering ondiepe ondergrond van de Rijks Geologische Dienst. In het gebied van het kaartblad zijn de sedimenten van de Noordzee Supergroep grotendeels in een marien milieu afgezet.

De Noordzee Supergroep wordt in het gehele gebied aangetroffen. De dikte van de supergroep varieert van 1250 tot 1500 m. Globaal neemt de dikte in noordwestelijke richting toe (kaart 13).

9.1.1 Onder-Noordzee Groep

De Onder-Noordzee Groep bestaat uit de Formatie van Landen en de Formatie van Dongen.

De *Formatie van Landen* is opgebouwd uit het Zand van Heers aan de basis en de Klei van Landen. De ouderdom van de formatie is Paleoceen. De formatie ligt discordant op de Krijtkalk Groep. Het *Zand van Heers* is een groengrijs, zeer fijnkorrelig glauconiethoudend zand, lokaal door kalkcement verkit. De dikte van het zand varieert van 10 tot 20 m. De *Klei van Landen* is een groengrijze klei of kleisteen, welke glauconiet, glimmers en pyriet bevat. Enkele door calcietcement verkitte niveaus komen voor. De Klei van Landen bereikt een dikte van 30 tot 40 m.

De *Formatie van Dongen* bestaat uit de Basale Tuffiet van Dongen, Klei van Ieper, Mergel van Brussel en de Klei van Asse. Binnen het kaartbladgebied neemt de dikte van de Formatie van Dongen in noordoostelijke richting toe van 440 m in de boring Zuidwal-2 tot 640 m in de boring Terschelling South-1. Deze diktetrend is zowel het gevolg van een grotere bekkendaling, als van erosie. Tevens worden grotere dikten aangetroffen in de Slenk van Meep, een slenkstructuur die van het westelijk deel van Terschelling naar het zuidoosten tot juist ten westen van de Friese kust loopt (kaart 13). De ouderdom van de Formatie van Dongen is Eoceen. De *Basale Tuffiet van Dongen* is opgebouwd uit glauconiethoudende kleien met tuf-inschakelingen. De dikte van deze eenheid varieert weinig in het gebied en bedraagt 10 tot 15 m. De *Klei van Ieper* bestaat uit een kleiige basis en een zandig bovendeel. Het kleiige, onderste gedeelte wordt gekenmerkt door de bruinigrijze kleur en kan pyriet, schelpresten en koolbrokjes bevatten. Het bovenste deel is groengrijs tot grijs van kleur en bevat siltige tot zandige inschakelingen met pyriet en glauconiet. De dikte van dit pakket varieert van circa 270 m in het zuidwestelijke deel van het kaartbladgebied tot 330 m in het noordoostelijke deel. In de Slenk van Meep bedraagt de dikte ruim 380 m (boring Slenk-1). De *Mergel van Brussel* is opgebouwd uit glauconiethoudende, groengrijze tot lichtgrijze, fijnzandige kleien, mergels, kalkzandsteen en kleiige zandsteen. De dikte van deze eenheid neemt in noordelijke richting toe van 80 m in de boring De Cocksdorp-1 tot ruim 120 m in de boring Terschelling-1. De *Klei van Asse* is een plastische, groengrijze tot blauwgrijze klei, welke glauconiet en pyriet bevat. De diktetrend van deze eenheid is behalve door depositie, voornamelijk erosief bepaald. De grootste dikte, van ruim 190 m, wordt waargenomen in de boring Terschelling South-1. De dikte is het kleinst in het zuidoostelijk deel van het kaartbladgebied, waar deze minder dan 50 m bedraagt.

9.1.2 Midden-Noordzee Groep

De Midden-Noordzee Groep ligt discordant op de Onder-Noordzee Groep. Deze groep wordt, eveneens discordant, bedekt door de Boven-Noordzee Groep. De groep bestaat uit de Formatie van Rupel en de Formatie van Veldhoven.

De *Formatie van Rupel* is onderverdeeld in het Zand van Berg en de Klei van Boom. In het grootste deel van het gebied wordt de formatie discordant bedekt door de Formatie van Breda, en is er sprake van een door erosie gereduceerde dikte. Slechts nabij Terschelling wordt de formatie concordant bedekt door de Formatie van Veldhoven. De aangetroffen dikte is hier, en plaatselijk ten zuiden van Vlieland, het grootst en bedraagt 105 m. In het overige deel van het gebied bedraagt de dikte 45 m. 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. Het Zand van Berg heeft een constante dikte van circa 5 m. De *Klei van Boom* bestaat uit een stugge, vette, bruin tot donkergroengrijze klei, gekenmerkt door het voorkomen van pyriet, glauconiet en glimmers. Tevens komen op enkele niveaus septariëknollen (kalkconcreties) voor. Waar de klei bedekt wordt door de Formatie van Veldhoven, en het meest compleet aanwezig is, kunnen in het bovenste deel enkele fijnzandige inschakelingen voorkomen.

De *Formatie van Veldhoven* bestaat uit grijsgroene, siltige kleien. De formatie is uitsluitend aanwezig in de boring Terschelling-1, met een dikte van 25 m. Aangenomen wordt dat deze formatie wel in het gehele gebied is afgezet, maar als gevolg van latere erosie grotendeels is verdwenen. De ouderdom van de formatie is Laat-Oligoceen tot Vroeg-Mioceen.

9.1.3 Boven-Noordzee Groep

Discordant op de Midden-Noordzee Groep ligt de Boven-Noordzee Groep. Deze is onderverdeeld in de Tertiaire Formatie van Breda en van Oosterhout en de Kwartaire Formatie van Maassluis en overige Kwartaire formaties.

De *Formatie van Breda* bestaat uit een onderste gedeelte met zeer glauconietrijke, groenzwarte kleien en een bovenste deel, waarin minder glauconiet voorkomt. Dit bovenste deel bestaat uit grijsgroene kleien met enkele zandige en/of siltige inschakelingen. De Formatie van Breda wordt discordant bedekt door de Formatie van Oosterhout. Als gevolg van erosie is de formatie niet aanwezig onder het westelijk deel van Terschelling. De dikte van de formatie varieert binnen het overige deel van het kaartbladgebied van 30 m in het westen tot 85 m in het oosten, in de Slenk van Meep. Deze diktevariatie is vermoedelijk het gevolg van later opgetreden erosie. De Formatie van Breda werd tijdens het Midden- en Laat-Mioceen afgezet.

De *Formatie van Oosterhout* bestaat uit licht tot donkergrijze, zandige kleien met soms een enkele zandinschakeling. Aan de top bevat de formatie veel schelpresten. Op grond van boorgegevens vertoont de Formatie van Oosterhout een opmerkelijke diktetrend. De dikte van de formatie neemt toe van 100 tot 140 m in de zuidoostelijke en noordwestelijke hoek van het kaartbladgebied, tot ruim 300 m in het gebied Zuidwal gebied (360 m in de boring Oude Inschot-1). De ouderdom van de Oosterhout Formatie is Pliocene.

De *Formatie van Maassluis* bestaat uit zanden en kleien, met schelpresten en glimmers. Aan de top van de formatie komen grove zanden en veel plantenresten voor. De dikte van de formatie

varieert van 150 m in het zuidwestelijke deel tot 200 m in het noordoostelijk deel van het kaartbladgebied. De ouderdom van de formatie is Kwartair (Vroeg-Pleistoceen).

De overige formaties van Kwartaire ouderdom zijn opgebouwd uit kleien, zanden en grind, afgezet onder continentale en ondiep-mariene omstandigheden.

9.2 Geologische ontwikkeling en paleogeografie

Zeespiegelbewegingen hebben een grote invloed gehad op de verbreiding van de Tertiaire en Kwartaire sedimenten binnen het kaartbladgebied. Tijdens perioden van hoge zeespiegelstand vond hier voornamelijk sedimentatie van kleien plaats, terwijl tijdens perioden van lage zeespiegelstand voornamelijk zanden werden afgezet. Een aantal tektonische bewegingen heeft tijdens het Tertiair geleid tot opheffing en erosie van het gebied. Hierdoor werden de dikte en de verbreiding van de aanwezige afzettingen beïnvloed (Letsch & Sissingh, 1983).

De diktevariatie van de Tertiaire afzettingen is mede bepaald door zoutbewegingen. Tijdens het Tertiair hebben zich verdikkingen van het Zechstein steenzout gevormd, en daarmee geassocieerd slenken in het afdekkende gesteentepakket. In de Slenk van Meep werden enerzijds dikkere pakketten sediment afgezet terwijl anderzijds hier meer sediment bewaard is gebleven na erosie.

10 Geologische Geschiedenis

Dit hoofdstuk beschrijft de geologische geschiedenis van het kaartblad Vlieland-Terschelling. Daarbij beperken wij ons tot de periode van het Laat-Carboon (de Varistische orogenese) tot het Kwartair, daar gegevens omtrent de periode vóór het Laat-Carboon in het kaartbladgebied ontbreken. Voor een grootschalige beschrijving van deze periode wordt verwezen naar publikaties van onder andere Ziegler (1982, 1989) en Glennie (1984).

Pré-Perm

Hoewel de Varistische orogenese ver ten zuiden van het hier behandelde kaartbladgebied ligt heeft zij een dusdanig grote invloed op de geologische geschiedenis, dat hier in het kort de ontwikkeling wordt beschreven. De Varistische orogenese tijdens het Laat-Carboon markeert de sluiting van de Proto Tethys. Het orogene front migreerde geleidelijk naar het noorden en kent in het Laat-Carboon drie deformatie-fasen; de Sudetische, de Asturische en de Saalische fase.

De Sudetische fase reflecteert de botsing tussen Gondwana in het zuiden, en Laurazië in het noorden. Een daardoor veroorzaakt noord-zuid gericht compressief krachtenveld gaf aanleiding tot de vorming van een oost-west verlopende gebergtegordel die zich dwars door Europa uitstrekte van Portugal tot in Midden-Europa. Als reactie op de tektonische belasting van de aardkorst door de opeenstapeling van Varistische overschuivingen, vormde zich langs de noordrand van het gebergte een voorlandbekken. Dit bekken werd aanvankelijk gekenmerkt door een relatief snelle accumulatie van afbraakprodukten afkomstig van het Varistische gebergte. Deze werden onder paralische omstandigheden afgezet. De tektonisch gegenereerde isostatische daling van het bekken werd door de grote sedimentaire belasting versterkt en versneld.

Ten tijde van de Asturische deformatie fase, aan het eind van het Westfalien, had het front van de Varistische orogenese zich naar het noorden verplaatst (Lorentz & Nicholls, 1976). Tijdens deze fase werden de afzettingen in het voorlandbekken sterk geplooid en noordwaarts getransporteerd over zwak hellende overschuivingsvlakken. Verder naar het noorden ontstonden open plooien van de Carbonische sedimenten als respons op bewegingen van breukblokken in het basement (Read & Watson, 1975; Ziegler, 1988). Daarnaast trad een langzame verandering op van een vochtig tropisch klimaat tijdens het Laat-Carboon naar een woestijnklimaat tijdens het Perm.

De Saalische deformatiefase, de laatste fase van de Varistische orogenese, is de uiting van een verandering in de relatieve bewegingsrichting tussen Gondwana en Laurazië tijdens het Stefanien. Het noord-zuid gerichte compressieve krachtenveld maakte plaats voor een oost-west georiënteerd krachtenveld van rekspanningen. Ten noorden van het Varistische orogene front ontstond zodoende een ongeveer noordwest-zuidoost georiënteerd breuksysteem, dat werd 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; Chadwick, 1985). De breukbewegingen gingen, met name in Noord-Duitsland, Polen en het Noordzeegebied, gepaard met vulkanisme (Lorentz & Nicholls, 1976), hetgeen een zeer diepe worteling van de breuken suggereert waarmee een belangrijke lithosferische thermale opwelling en de daarbij behorende regionale opheffing zou zijn geassocieerd (Ziegler, 1988). De Saalische deformatiefase duurde van het Stefanien tot in het Vroeg-Perm. Binnen het kaartbladgebied heeft de aan deze fase gelieerde erosie geresulteerd in een hiaat in de sedimentaire opeenvolging van om en nabij de overgang van het Westfalien A naar het Westfalien B tot en met het vroegste Perm. Met de opheffing van het Varistische gebergte en het daarbij behorende voorland werd het brongebied gecreëerd, van waaruit klastische sedimenten werden geleverd tijdens het Perm en de Trias.

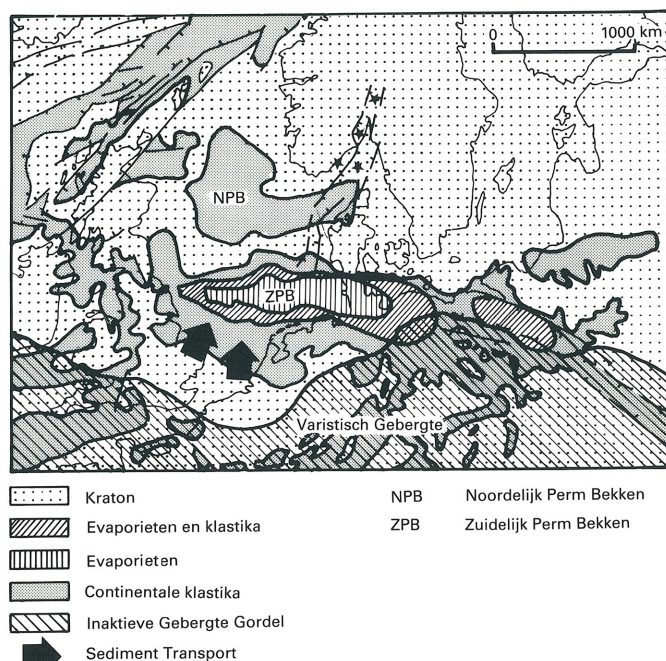
De structuren die aan het einde van het Carboon waren gevormd, blijken uit de afgedekte kaart van het pré-Perm (Van Wijhe, 1987). Omdat deze kaart hoofdzakelijk gebaseerd is op gegevens afkomstig uit boringen geeft zij slechts een globaal beeld van de structuratie (fig. 2.4). Uit het kaartbeeld blijkt dat er reeds enkele grootschalige structuren voorkwamen die in latere fasen van de geologische geschiedenis zouden worden gereactiveerd. De noordwest-zuidoost strekkende synclinale structuur in het zuiden van Nederland bijvoorbeeld, kan gezien worden als de voorganger van de Jurassische bekkens. Daarnaast wordt de aanwezigheid van een Laat-Carboon hoog, in een groot deel van Noord-Nederland, afgeleid uit de diep insnijdende erosie. Dit oorspronkelijk Asturische/Saalische hoog was een voorloper van het zogenaamde Texel-IJsselmeer Hoog dat zich met name tijdens de Trias en de Laat-Jura opnieuw manifesteert.

Perm

In het Vroeg-Perm hadden breukvorming, vulkanisme en de regionale opheffing, die met de laatste fase van de Varistische orogenese gepaard gingen, geresulteerd in een uitzonderlijk uitgestrekte landmassa.

Afkoeling van de lithosfeer, met name in gebieden waar het Vroeg-Permische vulkanisme een rol heeft gespeeld, had daling van de korst tot gevolg. Hierdoor ontstond een uitgestrekt, door gebergten omringd, intra-cratonisch continentaal bekken; het Zuidelijk Perm Bekken (fig. 10.1). Daar dit bekken, in min of meer dezelfde vorm, tot in de Trias zou voortbestaan, spreekt men ook wel van het Permo-Triassisch Bekken. Gesuperponeerd op de grootschalige daling resulteerden de, reeds tijdens het Laat-Carboon/Vroeg-Perm heersende, oost-west gerichte rekspanningen in de vorming van een aantal noord-zuid gerichte depressies. Hiervan waren met name het, ten westen van het kaartbladgebied gelegen Off-Holland Low, en de oostelijk gelegen Eems Trog van invloed op de ontwikkeling van het kaartbladgebied.

Figuur 10.1 Paleogeografische kaart van het Zuidelijk Perm Bekken (ZPB) ten tijde van het Vroeg-Perm. (naar Ziegler, 1988, Plate 7).



Het zuidelijk deel van het bekken was opgebouwd uit de Varistische gebergtegordel als achterland, met aan de voet daarvan een woestijngebied. In het centrale deel van het bekken vormde zich een zoutmeer. De afwatering concentreerde zich in rivierstelsels die zich in de eerder genoemde noord-zuid gerichte depressies vormden. Het kaartbladgebied lag in het overgangsgedebiet tussen de woestijn en het zoutmeer. De noordelijke begrenzing van het woestijngebied viel ongeveer samen met de breukbegrensde noordzijde van het Texel-IJsselmeer Hoog. Dit doet vermoeden dat de begrenzing van sedimentaire milieus tektonisch beïnvloed is.

Pal ten noorden van het Texel-IJsselmeer Hoog, ligt het Zuidwal Hoog. Aangenomen wordt dat het een erosierestant is van een koepelvormige structuur, welke werd gevormd als gevolg van een intrusie tijdens het Laat-Carboon of Vroeg-Perm. Een ontstaansgeschiedenis, waarbij een magmatisch proces een rol heeft gespeeld (al dan niet begeleid door vulkanisme), sluit niet alleen goed aan bij het wijdverbreide Vroeg-Permische magmatisme elders in het Zuidelijk Perm Bekken, maar lijkt ook aan te sluiten bij het Jurassische vulkanisme op deze lokatie (Herngreen et al., in druk).

In het gebied van het kaartblad is de sedimentaire ontwikkeling tijdens het Vroeg-Perm een weerspiegeling van enerzijds een aantal fluctuaties in de waterhoogte van het zoutmeer en anderzijds van de tektonisch bepaalde topografie. Een drietal verhogingen van het waterpeil resulteerden in een zuidwaartse uitbreiding van de lacustriene sedimenten (Hollum, Ameland en Ten Boer Kleistenen). De invloed van de topografie is af te leiden uit de diktetoename van de sedimentaire opeenvolging in het Off-Holland Low ten opzichte van die op het Texel-IJsselmeer Hoog. Voorts pleiten de verbreiding van de eolische zandstenen in het centrale deel van Nederland, en het voorkomen van fluviatiele zanden in de flankerende depressies (Van Wijhe et al., 1980, figuur 3) eveneens voor het beschreven reliëf.

Aanvankelijk fungeerden het Texel-IJsselmeer Hoog en het Zuidwal Hoog als een bron van grofklastische sedimenten. Gezien de ontwikkeling van de Onder-Slochteren Zandsteen op het Zuidwal Hoog en op het Texel-IJsselmeer Hoog (De Cocksdorp-1) lijkt het aannemelijk dat het Zuidwal Hoog langer zijn positief reliëf heeft behouden (fig. 3.5).

Rift-vorming in het Noord-Atlantische/Arctische gebied leidde, te zamen met een eustatische zeespiegelstijging als gevolg van de deglaciatie van Gondwana, aan het begin van het Laat-Perm tot de vorming van een open verbinding tussen de in het noorden gelegen Barentszee en het Noordelijk en Zuidelijk Perm Bekken. Deze verbinding was waarschijnlijk ten westen van Noorwegen gelegen, in de nabijheid van de huidige Viking Graben en de meer westelijk gelegen Rockall Trog (Ziegler, 1988). De transgressie vond vermoedelijk zeer snel en onder catastrofale omstandigheden plaats. Dit vond zijn oorzaak in het feit dat het Zuidelijk Perm Bekken aan het einde van het Rotliegend tot onder het toenmalige zeeniveau was gedaald, doordat de sedimentatiesnelheid geringer was dan de dalingssnelheid van het bekken (Glennie & Buller, 1983).

De Zechstein evaporieten zijn opgebouwd uit een aantal cycli, die vermoedelijk veroorzaakt zijn door zeespiegelfluctuaties tengevolge van ijstijden tijdens het Laat-Perm. Naast de afkoeling van de lithosfeer speelde tijdens het Laat-Perm waarschijnlijk ook de hoge sediment-belasting van de grote hoeveelheden, in korte tijd neergeslagen, zout een rol bij de daling van het Zuidelijk Perm Bekken.

Het Laat-Perm was een tektonisch relatief rustige periode. Op de verschillende hoog gelegen gebieden, het Terschelling Hoog in het noordoosten, het Zuidwal Hoog en het Texel-IJsselmeer Hoog in het zuidelijk deel van het kaartbladgebied, werden carbonaat-anhydriet platformen gevormd (fig. 4.4). In het noordelijk deel van het bekken, en in het Harlingen Subbekken (in het zuidoostelijk deel van het kaartbladgebied) werden voornamelijk zouten afgezet. De grote dikteverschillen wijzen op synsedimentaire tektoniek. De invloed van de depositionele hogen is voornamelijk tot de Zechstein 1, 2 en 3 Formaties beperkt gebleven.

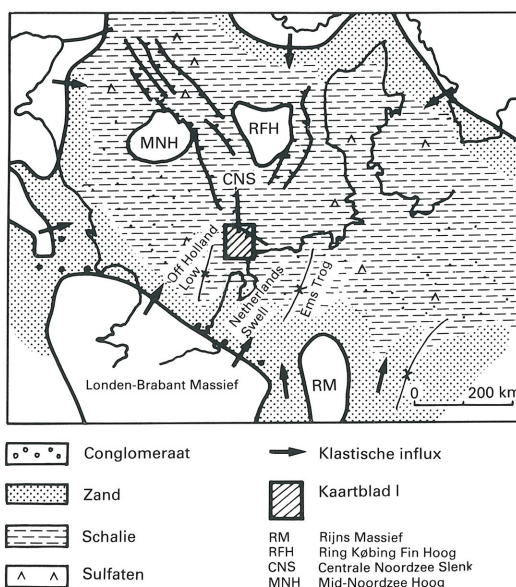
De opbouw van de hogere Zechstein cycli weerspiegelt een voortschrijdende verlanding van het kaartbladgebied en een opvulling van het reliëf. De verbreiding van de vierde cyclus is veel geringer dan de eerdere, van de vijfde cyclus komt alleen een klastische equivalent voor. Met de afvlakking van het reliëf kwam een einde aan de invloed van de tijdens het Perm nog aanwezige structurele eenheden zoals het Texel-IJsselmeer Hoog, het Zuidwal Hoog, het Off-Holland Low en de Eems Trog. Een zeespiegeldaling aan het einde van de Zechstein resulteerde uiteindelijk in de definitieve overgang van een marien naar een continentaal milieu (Vail et al., 1977; Fisher, 1984).

Trias

Het kaartbladgebied maakte tijdens de Vroeg-Trias deel uit van een uitgestrekt, vlak overstromingsgebied (fig. 10.2). De klastische sedimenten werden door fluviatiele systemen voornamelijk vanaf het Londen-Brabant Massief en uit het westen aangevoerd. Sedimentatie vond plaats onder fluviatiele en lacustriene omstandigheden.

Gedurende de Trias trad er een verandering op in het krachtenveld dat de structurele ontwikkeling van Noordwest-Europa bepaalde. Intensivering van de extensie in de megarifts in het Arctische/Noord-Atlantische en het Tethys/Centraal-Atlantische domein, leidde tijdens de Trias in toenemende mate tot regionale rekspanningen. Hierdoor ontwikkelde zich een complex riftsysteem, waarvan de meest zuidelijke uitloper, de Centrale Noordzee Slenk, zich bijna tot in

Figuur 10.2 Paleogeografie tijdens de Vroeg-Trias. Het kaartbladgebied is gesitueerd in het zuidelijk deel van het bekken. Klastische sedimenten hebben een zuidelijk brongebied; het Londen-Brabant Massief en het Massief Central. In het centrum van het bekken heerste een lacustrien milieu. (naar Ziegler 1982).

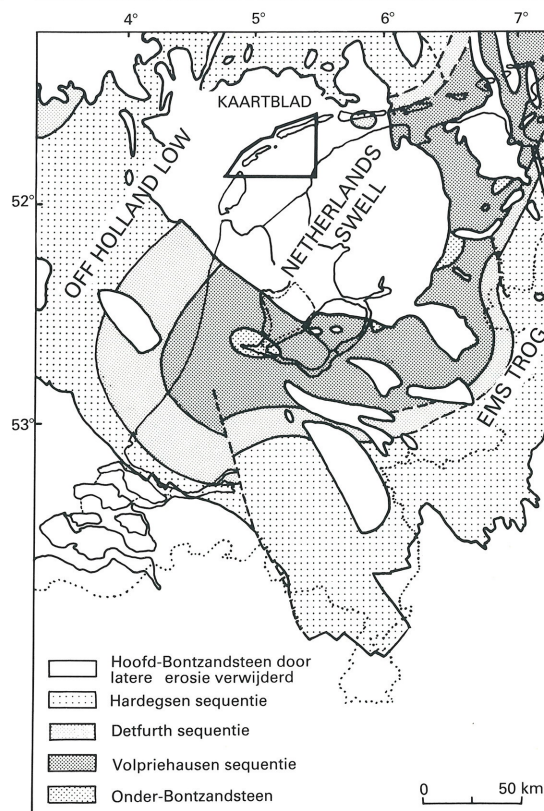


het kaartbladgebied uitstrekke. Dit alles resulteerde in een toenemende verandering van het Zuidelijk Perm (ofwel Permo-Triassisch) Bekken (Ziegler, 1982).

Na een aanvankelijk uniforme ontwikkeling van de sedimenten tijdens het begin van de Vroeg-Trias werden in eerste instantie de Permische structurele eenheden, zoals het Off-Holland Low, de Eems Trog en in zekere mate het Texel-IJsselmeer Hoog, opnieuw geaccentueerd. Zo begon tijdens de afzetting van de Rogenstein zich een min of meer NNO/ZZW georiënteerd hoog te ontwikkelen, de Netherlands Swell (Heybroek, 1974; RGD 1989a). Deze opwelling bevond zich min of meer op dezelfde plaats als het Texel-IJsselmeer Hoog maar had een grotere uitgestrektheid. Het kaartbladgebied bevond zich aan de noordwest rand van de hoge zone. De structuur wordt in het westen en het oosten geflankeerd door respectievelijk het Off-Holland Low en de Eems Trog (fig. 10.3). Het ontstaan van het hoog blijkt uit de opbouw van de Rogenstein die, in tegenstelling tot de uniforme ontwikkeling van de Hoofd-Kleistein, aan weerszijden van de Netherlands Swell duidelijk verschillend is. Sedimentatie concentreerde zich gedurende de rest van de Trias in toenemende mate in de dalingsgebieden als het Off Holland Low en de Eems Trog, terwijl op de Netherlands Swell slechts een relatief dunne opeenvolging van sedimenten werd afgezet.

De tektonische activiteit, zoals die zich in Nederland en Noordwest-Duitsland gedurende de Trias voordeed, was vrij mild. Zij bestond uit een aantal epeirogenetische bewegingen waardoor binnen het bekken verschillende glooiende depressies en opwellingen ontstonden, met slechts lokaal enige breukvorming (o.a. Van Hoorn, 1987; Trümphy, 1971). In de sedimentaire opeenvolging uitten deze bewegingen zich in intraformationele hiaten (Wolburg, 1967, 1969).

Figuur 10.3 Subcrop kaart van de Hardegsen discordantie, met daarin aangegeven de belangrijkste structurele eenheden. Het kaartbladgebied is gelegen aan de noordwestrand van de Netherlands Swell. Deze wordt geflankeerd door het Eems Trog en het Off-Holland Low (naar NAM & RGD, 1980).



Isopachen en facies verdeling van Trias sedimenten tonen aan dat de positie van de structurele elementen gedurende de Trias zeer constant was (Schröder, 1982).

Dat de tektonische activiteit tijdens de afzetting van de Hoofd-Bontzandsteen in pulsen optrad wordt gereflecteerd in de opbouw van de sedimentaire opeenvolging. Perioden van tektonische activiteit uitten zich in de vorm van bekkeninwaarts prograderende fluviatiele systemen (Brennand, 1975).

Op de hernieuwd opgeheven gebieden werden gecondenseerde sedimentaire opeenvolgingen afgezet. Aan het einde van de Vroeg-Trias trad een dusdanige opheffing van de Netherlands Swell op dat er zelfs erosie plaatsvond. Deze, zogenaamde Hardegse erosiefase, heeft zich op de Netherlands Swell plaatselijk tot in de Onder-Bontzandsteen ingesneden en zodoende ongeveer 150 m sediment verwijderd.

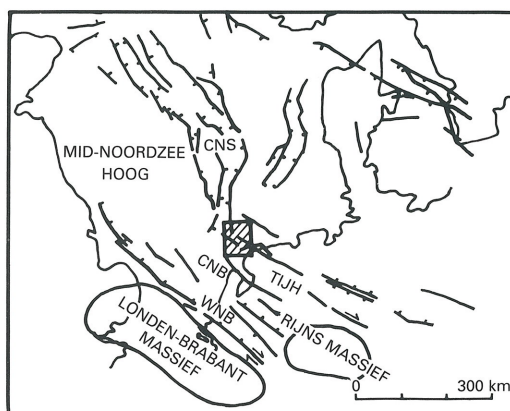
Vanaf het einde van de Vroeg-Trias (Anisien en Ladinien) zorgde de samenloop van voortgaande bekkendaling en een netto zeespiegelstijging (Vail et al., 1977), voor een steeds verder uitbreidende transgressie. Sedimentatie in distale floodplain, sabkha en ondiep mariene milieus wisselde af met perioden van evaporietontwikkeling. Daarnaast was de drastische afname van klastische influx van invloed op het afzettingsmilieu. Een regressie tijdens de Laat-Trias (Keuper) deed de continentale omstandigheden wederom overheersen.

De jongere eenheden van de Trias (de Röt, Muschelkalk en Keuper Formaties) zijn waarschijnlijk wel binnen het kaartbladgebied afgezet, maar door latere erosie verdwenen. De complete Trias opeenvolging in het Centraal Nederlands Bekken en in de zuidelijke Centrale Noordzee Slenk alsmede het ontbreken van laterale faciesveranderingen in de richting van de Netherlands Swell maken dit aannemelijk.

Jura

Hoewel het Rhaetien formeel tot de Trias behoort, is het in het kader van de beschrijving van de geologische geschiedenis logischer om het bij de paragraaf over de Jura te behandelen. Aan het begin van het Rhaetien trad namelijk de zogenaamde Vroeg-Kimmerische fase op. Dit was de

Figuur 10.4 Tektonische eenheden gedurende de Jura. Juist ten noorden van Nederland gaat de N/Z gerichte riftvorming van de Centrale Noordzee Slenk over in NW/ZO gerichte trans-tensionele schuifbewegingen langs gerejuveneerde Varistische structuren. (naar Ziegler, 1982).



CNB Centraal-Nederlands Bekken
CNS Centrale Noordzee Slenk
TYH Texel-IJsselmeer Hoog
WNB West-Nederlands Bekken

eerste van een aantal grootschalige extensionele tektonische fasen die de structurele ontwikkeling van Noordwest-Europa gedurende de Jura beheersten. De Jura is de periode waarin de desintegratie van Pangea in gang werd gezet. Dit was een min of meer continu proces waarin een aantal fasen zijn te onderscheiden. Hoewel de tektonische activiteit van deze verschillende Kimmerische fasen gerelateerd is aan de belangrijkste onderbrekingen in de stratigrafische opeenvolging, impliceert dit dus niet dat het strikt gescheiden tektonische gebeurtenissen zijn (Stille, 1924; Ziegler, 1978, 1982).

Onder invloed van de rekspanningen tijdens de Kimmerische fase trad een verdere zuidwaartse uitbreiding van de Centrale Noordzee Slenk op. Echter nog voor de rift het Nederlands territoriaal gebied bereikt had, werd dit spanningsveld geacommodeerd door middel van transtensionele NW/ZO gerichte breukvorming. Dit geschiedde enerzijds onder invloed van het rigide Londen-Brabant Massief dat zuidwaartse progradatie bemoeilijkte en anderzijds onder invloed van een relatieve zwaktezone die gevormd werd door een van oorsprong Varistisch (eventueel zelfs Caledonisch) breukenstelsel, ten noorden van het massief. Zodoende vormden zich, parallel aan het Londen-Brabant Massief, een aantal NW/ZO georiënteerde bekkens en hogen (fig. 10.4). Dit zijn grotendeels rejuvenaties van Laat-Carbonische structuren. Hiervan hebben het Centraal-Nederlands Bekken, het Texel-IJsselmeer Hoog en het Vlieland Bekken direct invloed gehad op de ontwikkeling van de geologie binnen het kaartbladgebied.

De Vroeg-Kimmerische fase was, voor zover aanwijsbaar in de stratigrafische opeenvolging, in Noordwest-Nederland van geringe tektonische betekenis. Het beperkte zich tot een lichte opheffing en daarmee samenhangende erosie (Haanstra, 1963). In het oosten van het land en in Duitsland was de betekenis veel groter (de erosie kan lokaal ongeveer 600 m bedragen; Schröder, 1982). Voor de omgeving van het kaartbladgebied is het meest in het oog springende van deze tektonische fase dan ook de omslag in het sedimentaire milieu. Vanaf het Rhaetien is er weer sprake van mariene omstandigheden. Deze omstandigheden, veroorzaakt door tektonische daling en een grote zeespiegelstijging, zouden tot in de Midden-Jura duren. Hoewel in het door het kaartblad bestreken gebied geen sedimenten van Vroeg-Jura ouderdom voorkomen bestaat er vrij grote zekerheid dat zij er wel zijn afgezet. De huidige voorkomens van Vroeg-Jura sedimenten (Centraal-Nederlands Bekken, Centrale Noordzee Slenk, Nedersaksisch Bekken) vertonen namelijk een onderling uniforme opbouw van fijnkorrelige sedimenten, hetgeen op sedimentatie in een uitgestrekt aaneengesloten bekken wijst. Aannemelijk is dat de Netherlands Swell, zoals die bestond tijdens de Trias, na de Vroeg-Kimmerische tektonische fase een relatief langzaam dalend onderdeel vormde van een groter bekken tijdens de afzetting van de Onder-Jura.

De aard van de Midden-Jura sedimenten zoals aangetroffen in het West-Nederlands Bekken wijst erop dat de sedimentatie zich in toenemende mate beperkte tot de bekkens (Van Wijhe, 1987). Een overeenkomstig regressief sedimentatiepatroon treft men namelijk aan langs de westrand van het Nedersaksisch Bekken (Betz et al., 1987). Dit alles hangt samen met een eustatische zeespiegeldaling die, gecombineerd met een verheving in tektonische activiteit, aan het begin van de Midden-Jura optrad (Vail et al., 1977; Ziegler, 1982). In Noordwest-Europa uitte deze zogenaamde Midden-Kimmerische fase zich in de vorming van een, door grote warmte geïnduceerde, opwelving in de centrale Noordzee. Met deze opheffing ging diep insnijdende erosie gepaard. Het is aannemelijk dat binnen het kaartbladgebied om bovenbeschreven redenen geen of weinig sedimentatie heeft plaatsgevonden. De sedimenten die tijdens de Vroeg-Jura binnen het kaartbladgebied waren afgezet zijn waarschijnlijk gedurende de Midden-Kimmerische fase geërodeerd.

Als laatste van de Kimmerische deformatie fasen voltrok zich de Laat-Kimmerische fase welke zich in grote lijnen tijdens de Laat-Jura afspeelde. Binnen deze fase zijn twee hoofdpulsen te onderscheiden; de eerste vond plaats aan het einde van de Midden-Jura of aan het begin van de Laat-Jura, de tweede aan het einde van de Laat-Jura en het begin van het Krijt. Als gevolg van deze Laat-Kimmerische deformatie fase ontstonden in Noord-Nederland het Texel-IJsselmeer Hoog (dit gebied werd wederom opgeheven) en het Noord-Nederlands Hoog. Stäuble & Milius (1970) stellen dat het Noord-Nederlands Hoog van Laat-Jura/Vroeg-Krijt ouderdom is. De verbreiding van de Laat-Jurassische sedimenten (Delfland Formatie), alsmede de ouderdom van het vulkanisme maken het waarschijnlijk dat reeds bij de eerste puls de hoofdstructuur van Noord-Nederland is bepaald. Gedurende het proces (eerste en tweede puls) van opheffing, kanteling en erosie, is het Noord-Nederlands Hoog in verschillende elementen opgebroken (Stäuble & Milius, 1970). Voor het kaartbladgebied zijn met name het Texel-IJsselmeer Hoog en het Vlieland Bekken van belang.

Het Vlieland Bekken werd, als een kleine extensiestructuur, gevormd door zijschuivingen langs gereactiveerde, min of meer noordwest-zuidoost georiënteerde Laat-Carbonische breuken (Herngreen et al., in druk; kaart 1). Deze beweging ging gepaard met vulkanisme in het Zuidwal gebied. De samenstelling van het vulkanisch gesteente wijst op een affiniteit met een basaltisch magma, hetgeen in verband wordt gebracht met intra-cratonisch vulkanisme (Dixon et al., 1981; Perrot & Van der Poel, 1987). Het wordt niet onmogelijk geacht dat het optreden van Jurassisch vulkanisme verband houdt met het eerder veronderstelde Laat-Carbonische of Vroeg-Permische vulkanisme in het Zuidwal gebied.

Het is aannemelijk dat de Zuidwal vulkaan op de koepelvormige structuur moet hebben gestaan die voorafgaand aan het vulkanisme werd gevormd door een, hoog in de korst binnengedrongen, intrusie. De aanwezigheid van een omvangrijke magnetische anomalie in het Zuidwal gebied (Perrot & Van Der Poel, 1987, fig. 12), wijst op het op grotere diepte beneden de Carbonische sedimenten voorkomen van gesteenten van magmatische oorsprong. Op dit complex, bekend als de Zuidwal Volcanic Dome, liggen Carbonische en Permische gesteenten in een hogere structurele positie dan in het omliggende gebied (kaart 1).

Het Vlieland Bekken werd door de Zuidwal Volcanic Dome opgesplitst in een noordelijk en een zuidelijk Vlieland Subbekken. Tijdens de Laat-Jura en gedurende het oudste Vroeg-Krijt werd in het noordelijk subbekken een mariene opeenvolging met een regressief karakter afgezet. De Zuidwal Volcanic Dome beschermde het zuidelijk subbekken vrijwel volledig tegen mariene invloeden waardoor het voornamelijk continentale afzettingen bevat (Herngreen et al., in druk).

Gedurende de Laat-Jura en het Vroeg-Krijt vond een tektonisch gecontroleerde sedimentatie plaats. Differentiële bewegingen, behorende tot de Laat-Kimmerische fase, creëerden gelijktijdig breukbegrensde sedimentaire bekkens en aangrenzende opgeheven gebieden. Deze laatste waren brongebied voor de klastische afzettingen van de Delfland en Vlieland Formaties.

Krijt

Vanaf het begin van het Vroeg-Krijt maakten de differentiële bekkenbewegingen plaats voor een regionale daling. Hancock (1984) en Ziegler (1989) verklaren de afname van de rift-activiteit in de Noordzee door de concentratie van de oceaانvorming (sea-floor spreading) in de Noord-Atlantische Oceaan en de Golf van Biscaye. Breuken die de riftsystemen bepaalden werden, voorzover dat in het Vroeg-Krijt nog niet was gebeurd, in het Laat-Krijt inactief.

Een aantal opeenvolgende transgressies (Ryazanien, Albien en Cenomanien) beëindigde een periode van continentale sedimentatie. Dit culmineerde uiteindelijk in het Laat-Krijt tot een open marien milieu dat zich over een groot deel van Europa ten noorden van de Alpen en Karpaten uitstreekte (Hancock & Scholle, 1975). De transgressie is het gevolg van een mondiale zeespiegelstijging, die waarschijnlijk de respons was op de toegenomen spreidingsactiviteit in de mid-oceanische ruggen (Pitman, 1978; Donovan & Jones, 1979). De maximale uitbreiding van de transgressie vond plaats in het Laat-Campanien (Hancock & Scholle, 1975). Doordat de transgressie zich steeds verder uitbreidde werd de afstand tot de brongebieden van klastische sedimenten navenant groter. Hierdoor, en door de afname van het oppervlakte van het brongebied, werd in de loop der tijd het aandeel van het terrigeen klastische materiaal vrijwel nihil waardoor de Laat-Krijt afzettingen voornamelijk uit bioklastische bestanddelen bestaan.

In de beginfase van de Vroeg-Krijt transgressie werden de zanden aan de basis van de Vlieland Formatie afgezet, welke economisch van belang zijn vanwege hun gasvoering in de Zuidwalstructuur en diverse gasvelden in Friesland. Het reliëf van de Zuidwal Vulkan werd vervolgens tijdens het Vroeg-Krijt zowel door opvulling van het Vlieland Bekken als door erosie van de vulkaan genivelleerd. Dit blijkt uit de diktekaarten van de Boven-Jura, de Rijnland Groep en de Krijtkalk Groep (kaarten 8, 10 en 12). Als gevolg van de aanhoudende stijging van de zeespiegel tijdens het Hauterivien en Barremien werden de grenzen van het Vlieland Bekken overschreden. De zee strekte zich over een steeds groter deel van het Texel-IJsselmeer Hoog en het Noord-Nederlands Hoog uit en de rol van het Vlieland Bekken als depocentrum werd zodoende beëindigd. Tijdens deze periode vond een lokale reactivatie van breuken plaats. Met name langs het Texel-IJsselmeer Hoog werden slenken en horstblokken gevormd. De zeespiegelschommelingen die zich in de tweede helft van het Vroeg-Krijt voordeden laten op de hogen steeds een groter hiaat zien dan in het centrum van het Vlieland Bekken. Uiteindelijk wordt met de Albien transgressie het Texel-IJsselmeer Hoog en het Noord-Nederlands Hoog overspoeld (Crittenden, 1987).

Aan de relatieve tektonische rust en regionale daling kwam vermoedelijk reeds aan het begin van het Laat-Krijt een einde. Er ontwikkelde zich een compressief krachtenveld dat geacht wordt te zijn veroorzaakt door de botsing tussen de Europese en Afrikaanse platen. Deze krachten zouden zich gedeeltelijk naar het Noordwest-Europees platform hebben voortgeplant (Ziegler, 1982). Hierdoor werden reeds aanwezige oudere breuken middels, vermoedelijk sinistrale, schuifbewegingen (Van Wijhe, 1987) gereactiveerd. Dit resulteerde in de opheffing van een aantal voormalige bekkens (inversie). Hiertoe behoorde ook het Vlieland Bekken. De inversie voltrok zich in een serie pulsen die in twee hoofdfasen worden gegroepeerd; te weten de Subhercynische fase (Santonien en Campanien) en de Laramische fase (eind Krijt).

Uit de isopachenkaarten van de Krijtkalk Groep en de Rijnland Groep (kaarten 10, 12 en 16) blijkt zeer duidelijk dat het dalingsgebied van het Vlieland Bekken (Laat-Jura/Vroeg-Krijt) samenvalt met het geïnverteerde gebied (Laat-Krijt). Dit ondersteunt het vermoeden dat inversie zich voltrekt middels reactivatie van reeds bestaande breuken (o.a. Betz et al., 1987; Van Hoorn, 1987; Ziegler, 1987). In tegenstelling tot bijvoorbeeld het Sole Pit High (Van Hoorn, 1987), het Nedersaksisch Bekken (Betz et al., 1987) en het Centraal-Nederlands Bekken (Van Wijhe, 1987) hebben zich langs de geïnverteerde zone van het Vlieland Bekken geen depositionele troggen ontwikkeld. Dit houdt mogelijkerwijs verband met het feit dat het hier om een betrekkelijk kleine structuur gaat die gelijkmatig is geïnverteerd.

Gelijktijdig met de Subhercynische inversie van de voormalige bekkens ondergingen het Texel-IJsselmeer Hoog en het platform in Friesland een relatieve daling. Het omgekeerde reliëf blijkt uit de onlap van sedimenten tegen de flanken van de geïnverteerde bekkens en uit de hoekdiscordanties in de geïnverteerde gebieden. Ondanks de inversie ging de sedimentatie in het grootste deel van het kaartbladgebied verder. De Krijtkalk opeenvolging die nabij de inversie-as is afgezet, is weliswaar zeer dun (100-150 m), maar uit biostratigrafisch onderzoek blijkt dat het een gecondenseerde opeenvolging is die sedimenten bevat uit vrijwel alle etages van het Laat-Krijt. Naast verdunningen komen ook kleine intraformationele hiaten, afsnijdingen en prograderende opeenvolgingen voor; dit is met name gedurende het Santonien en het Campanien het geval (RGD 1989c; RGD 1988a). Zij wijzen op een intermitterende opheffing waarbij, afhankelijk van de snelheid, een verdunde opeenvolging werd afgezet dan wel erosie optrad. In perioden van tektonische rust vond in het gehele gebied weer sedimentatie plaats.

De Laramische fase, aan het einde van het Krijt, ging in het studiegebied gepaard met een betrekkelijk geringe erosie. Er blijkt dat vrijwel niets of slechts een gering deel van het Maastrichtien verwijderd is (Perrot & Van den Poel, 1987; Van den Bosch, 1983). Opvallend is dat een vergelijkbare variatie in intensiteit en ouderdom van inversiestructuren in Duitsland is waargenomen (Betz et al., 1987; Baldschuhn et al., in druk).

Uitgaande van de veronderstelling dat het Noord-Nederlands Hoog gedurende de Subhercynische en Laramische fase relatief stabiel was, kan de ongeveer 700 à 800 m dikke Krijtkalk Groep die daar is afgezet als referentie worden gekozen voor het bepalen van de relatieve tektonische bewegingen. In het Vlieland Bekken resteert een opeenvolging van slechts 100 m hetgeen dus een totale relatieve opheffing van 600 à 700 m impliceert. Deze opheffing heeft voor het belangrijkste deel tijdens de Subhercynische fase plaatsgevonden. Gelijktijdig met de inversie van het Vlieland Bekken ging de daling in het Centraal Nederlands Bekken door. Ten opzichte van het Noord-Nederlands Hoog daalde de noordoost rand van het bekken ongeveer 800 m.

Door differentiële compactie over de Zuidwal Volcanic Dome, ontstond in de zandstenen aan de basis van de Vlieland Formatie een anticlinale flexuur ('draping'). Dit, gecombineerd met het verhoogde structurele reliëf van de top van het Vlieland Zandsteen Laagpakket door bekkeninversie, waren belangrijke voorwaarden voor het ontstaan van het latere Zuidwal gasveld.

Tertiair

Na de Laramische compressieve tektonische fase vormde zich in Noordwest-Europa een nieuw bekken, het Noordzee Bekken, dat tot op heden de sedimentaire processen beïnvloedt. Tijdens het Tertiair en het Kwartair nam de dalingssnelheid van het Noordzee Bekken spectaculair toe en werd in het centrum in circa 65 miljoen jaar meer dan 3000 m sediment afgezet. Deze sedimenten bestaan voornamelijk uit erosieproducten van de Laat-Krijt opgeheven gebieden. Nederland bevindt zich aan de zuidelijke rand van dit Noordzee Bekken.

Het reliëf, ontstaan door inversie van de verschillende bekkens, werd aan het begin van het Tertiair voor een groot deel afgevlakt door erosie. De verandering in sedimentaire facies weerspiegelt de overgang naar een nieuwe fase in de botsing tussen de Europese en Afrikaanse schollen. De sterk opgeheven gebieden raakten onderhevig aan erosie. De grote hoeveelheden klastische afbraakproducten verdrongen het open marine milieu. Binnen het kaartbladgebied bedroeg de Tertiaire daling in het zuidoosten 1100 m, terwijl in de richting van de dalingsas van het Noordzee Bekken dit tot 1600 m oploopt (kaart 13). In dit snel dalende bekken waren dit in

eerste instantie voornamelijk mariene klei- en zandopeenvolgingen. Vanaf het Mioceen werden de fluviatiele invloeden (vanuit het oosten) belangrijker.

De afzettingsprocessen gedurende het Tertiair zijn in grote mate beïnvloed door zeespiegelbewegingen. Hierbij werden tijdens hoge zeespiegelstanden voornamelijk kleien afgezet, en tijdens de regressies hoofdzakelijk zanden. Een aantal aan de Alpiene orogenese gerelateerde tektonische fasen heeft geleid tot opheffing en erosie. Hierdoor zijn de dikte en de verbreiding van de aanwezige afzettingen beïnvloed (Letsch & Sissingh, 1983). Belangrijke erosiefasen traden op tijdens het Vroeg-Oligoceen (gerelateerd aan de Pyreneïsche fase) en nabij de overgang Oligoceen-Mioceen (in verband met de Savische fase). Deze tektonische fasen vonden hun oorzaak in de voortschrijdende bewegingen van de Europese en Afrikaans-Arabische platen. Het voorkomen van tuffen in de Eocene afzettingen wordt gerelateerd aan vulkanisme onder andere in het huidige Skagerak-gebied (Ziegler, 1982).

De Tertiaire afzettingen zijn op verschillende plaatsen verstoord door zoutbewegingen die tijdens het Eoceen en Oligoceen zijn opgetreden. Onder invloed van de tektonische spanningen hebben zich verdikkingen van het steenzout gevormd. De boven de kammen van deze zoutruggen ontstane rekspanningen in het Tertiaire afdekpakket hebben tot breukvorming geleid. Hierdoor ontstonden zowel groeibreuken langs de flanken van zoutstucturen als slenken boven de kammen van deze structuren. De meest opvallende slenk loopt van de westzijde van Terschelling in zuidoostelijke richting (kaart 13).

Appendix A

Overzicht gebruikte seismische gegevens

<i>Survey/lijn</i>	<i>Jaar</i>	<i>Eigenaar</i>
2273	1961	NAM
2277	1961	NAM
845	1964	NAM
69W-	1969	Petroland
S69-	1969	Petroland
7090	1970	NAM
717142	1971	NAM
7180	1971	NAM
71W	1971	Petroland
7281	1972	NAM
799	1979	NAM
80-W-	1980	Petroland
FR75-	1975	Petroland
FR77-29	1977	Petroland
FR78-38	1978	Petroland
NSW-1	1984	Western Geophysical
PL-	1970	Placid

Appendix B

Overzicht gebruikte boringen

<i>Boring</i>	<i>Code</i>	<i>Eigenaar</i>	<i>Einddiepte</i>	<i>Jaar</i>
Barradeel NE-1	BAR-NE-1	Shell	2553	1970
Bolsward-1	BWD-1	NAM	2679	1971
Den Burg-1	BRG-1	Petroland	2865	1964
De Cocksdorp-1	COC-1	Petroland	2798	1964
Franeke-1	FRA-1	Petroland	1837	1978
Harlingen West-1	HAW-1	Placid	3348	1965
Harlingen-1	HRL-1	Petroland	3103	1965
Harlingen-2	HRL-2	Petroland	1870	1965
Harlingen-3	HRL-3	Petroland	2003	1965
Heegermeer-1	HGM-1	Chevron	2144	1973
Hollum-Ameland-1	HOA-1	NAM	2934	1964
Hollum-Ameland-3	HOA-3	NAM	3212	1972
Meep-1	MEE-1	NAM	3240	1969
Oude Inschot-1	OIS-1	Petroland	2350	1972
Peins-1	PEI-1	Petroland	1884	1982
Ried-1	RID-1	NAM	3039	1952
Ried-2	RID-2	Petroland	1806	1980
Riepel-1	RPL-1	Petroland	2509	1972
Slenk-1	SLK-1	Petroland	2482	1971
Terschelling-1	TER-1	NAM	3036	1964
Terschelling-2	TER-2	NAM	2862	1964
Terschelling South-1	TES-1	MOBIL	2981	1965
Vlieland Oost-1	VLO-1	NAM	2572	1965
Zuidwal-1	ZDW-1	Petroland	3002	1970
Zuidwal-2	ZDW-2	Petroland	2632	1971
Zuidwal-3	ZDW-3	Petroland	2060	1971
Zurich-1	ZUR-1	Placid	2164	1965
L9-1	L09-1	Phillips	3824	1973
L12-1A	L12-1-A	Signal	3451	1969
L12-2	L12-2	NAM	3276	1976
L12-3	L12-3	NAM	3150	1979
M7-1	M07-1	Phillips	3590	1969
M9-1	M09-1	NAM	3587	1968

Reservoirsommities Boven-Rotliegend Groep en zandsteeneenheden

Toegepaste cut-off waarden: kleigehalte $V_{cl}(co) = 50\%$; effectieve porositeit $\emptyset_e(co) = 6\%$; watersaturatie $Sw(co) = 90\%$. De cut-off waarden zijn enigszins arbitrair omdat er van de bestudeerde Boven-Rotliegend zandsteentrajecten geen kernanalyses beschikbaar zijn. $\emptyset_{em}$ gemiddelde effectieve porositeit; V_{clm} gemiddeld kleigehalte; Sw_m gemiddelde watersaturatie. Bruto, Netto in meters; $\emptyset_{em}$, V_{clm} en Sw_m in procenten. Boringen waarin alleen een gedeelte van het Boven-Rotliegend traject werd geëvalueerd worden aangegeven met *.

In de olie-industrie worden zones, waarvoor geldt $Sw_m > 80$, niet tot de payzone gerekend.

Boven-Rotliegend Groep

Put	Bruto	Reservoir			Pay			
		Netto	$\emptyset_{em}$	V_{clm}	Netto	$\emptyset_{em}$	V_{clm}	Sw_m
BWD-1	128.0	116.7	14.2	21.1	1.7	14.8	17.5	88.1
COC-1	218.0	144.4	10.6	36.0	68.7	12.6	34.3	80.0
*HOA-3	176.0	40.2	8.7	18.3	40.2	8.7	18.3	65.2
*HRL-1	79.5	17.5	8.0	33.4	5.6	9.7	32.7	83.9
MEE-1	305.0	130.4	12.9	26.9	67.1	15.0	24.8	83.4
OIS-1	161.0	129.0	14.6	34.4	89.2	15.9	32.5	83.2
RPL-1	162.5	160.5	14.8	24.9	159.1	14.8	24.9	75.5
TES-1	329.0	77.3	10.5	23.1	37.9	11.9	20.1	77.8
*ZDW-2	163.1	112.5	13.3	27.4	31.8	12.9	28.0	81.0
L12-1-A	250.5	23.2	10.7	29.3	23.2	10.7	29.3	45.6
*M07-1	294.3	16.3	9.1	27.2	1.4	7.6	35.8	81.7

Slochteren Zandsteen

Put	Bruto	Reservoir			Pay			
		Netto	$\emptyset_{em}$	V_{clm}	Netto	$\emptyset_{em}$	V_{clm}	Sw_m
BWD-1	119.0	116.0	14.3	21.0	1.7	14.8	17.5	88.1
RPL-1	162.5	160.5	14.8	24.9	159.1	14.8	24.9	75.5

Boven-Slochteren Zandsteen

Put	Bruto	Reservoir			Pay			
		Netto	Øem	Vclm	Netto	Øem	Vclm	Swm
COC-1	122.0	97.4	10.1	37.6	45.1	11.8	36.6	84.0
*HOA-3	87.5	40.0	8.7	18.2	40.0	8.7	18.2	65.4
*HRL-1	57.0	17.5	8.0	33.4	5.6	9.7	32.7	83.9
MEE-1	133.4	123.7	13.1	26.8	64.1	15.2	24.8	83.4
OIS-1	120.5	113.8	14.7	34.3	81.1	15.8	32.8	83.2
TES-1	123.0	72.9	10.6	22.9	35.4	12.2	19.4	78.6
ZDW-2	110.0	102.2	13.7	27.6	24.4	13.8	29.2	81.4
L12-1-A	25.0	19.7	10.7	29.7	19.7	10.7	29.7	46.4
M07-1	57.3	14.6	9.3	26.3	0.0	-	-	-

Onder-Slochteren II

Put	Bruto	Reservoir			Pay			
		Netto	Øem	Vclm	Netto	Øem	Vclm	Swm
COC-1	46.5	35.9	11.8	31.9	17.4	14.2	28.9	78.6
OIS-1	10.0	9.2	15.4	31.7	5.6	18.9	25.9	82.1
ZDW-2	9.0	4.2	7.3	19.7	3.2	7.5	19.5	80.8
L12-1-A	9.5	0.6	6.7	36.4	0.6	6.7	36.4	57.1

Onder-Slochteren I

Put	Bruto	Reservoir			Pay			
		Netto	Øem	Vclm	Netto	Øem	Vclm	Swm
COC-1	12.5	6.6	13.2	29.6	5.2	13.6	29.8	55.7
MEE-1	24.7	0.8	6.3	22.8	0.8	6.3	22.8	78.6
L12-1-A	9.5	0.0	-	-	0.0	-	-	-

Appendix D

Appendix D

Show, status en testgegevens Boven-Rotliegend Groep

D&A droog en abandoned; FIT formatie interval test (test interval in meters log diepte); DST drill stem test; PRP productie proef; W water; GCW gas cut water; G gas; debiet water in liters per uur; n.c. niet commerciële hoeveelheid; Rw elektrische weerstand van het formatiewater in Ohm m²/m (meettemperatuur, °C);

Put	Show	Status	Test	Interval	Opbrengst	Debiet	Rw	Eenheid
BWD-1	–	D&A	FIT 1	2500	W	20		ROSL
COC-1	–	D&A	DST 3	2413-2431	W	3500		ROCLT
HOA-3	–	D&A	PRP 1	3075-3125	W	7850		ROSLU
HRL-1	gas	D&A	DST 5	3013-3031	GCW	107		ROCLT
			DST 6	3081-3103	GCW	1600		ROSLU
MEE-1	–	D&A	–					
OIS-1	–	D&A	DST 1	2161-2197	W	3200		ROSLU
RPL-1	–	D&A	DST 2	2304-2324	W	22300		ROSL
TES-1	–	D&A	DST	2645-2654	W	1270		ROSLU
ZDW-2	–	D&A	DST 2	2372-2393	W		0.0424(24)	ROSLU
L12-1-A	gas	D&A	PRP	2950-2975	G	n.c.		ROSLU
			DST	3042-3451	GCW			ROCLH, ROSLII, ROSLII, DC
M07-1	–	D&A	DST 1	3198-3258	GCW	680		ROCLT
			DST 2	3139-3590	W	10200		ROCLT, ROSLU, ROCLA,DC
			DST 3	3198-3400	W		0.0532(33.3)	ROCLT

Appendix E

Reservoirsommaries bovenste Delfland Formatie

Bovenste zandsteeneenheid Delfland Formatie

Toegepaste cut-off waarden:
 kleigehalte $V_{lc}(co) = 50\%$; effectieve
 porositeit $\phi_e(co) = 8\%$; watersaturatie
 $S_w(co) = 90\%$. De keuze van de cut-off
 waarde van de effectieve porositeit
 werd afgeleid uit kerngegevens. Voor
 de betekenis van de overige symbolen
 zie appendix C.

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>			<i>Pay</i>			
		<i>Netto</i>	ϕ_{em}	<i>Vclm</i>	<i>Netto</i>	ϕ_{em}	<i>Vclm</i>	<i>Swm</i>
HRL-1	4.0	1.8	35.2	30.4	1.8	35.2	30.4	40.7
OIS-1	18.0	9.4	14.5	19.5	0.1	17.2	47.5	89.0
SLK-1	6.4	4.8	19.7	13.3	0.0	–	–	–
VLO-1	7.0	6.0	17.8	13.9	0.0	–	–	–
ZDW-2	26.0	16.2	16.3	19.0	1.5	16.8	23.0	79.6
ZDW-3	6.0	4.1	16.3	6.2	0.0	–	–	–

Reservoirsommities Vlieland Zandsteen

Toegepaste cut-off waarden:

kleigehalte $V_{lc}(co) = 50\%$; effectieve porositeit $\phi_e(co) = 8\%$; watersaturatie $S_w(co) = 90\%$. De keuze van de cut-off waarde van de effectieve porositeit werd afgeleid uit kernegevens. Voor de betekenis van de overigesymbolen zie appendix C.

<i>Put</i>	<i>Bruto</i>	<i>Reservoir</i>			<i>Pay</i>			
		<i>Netto</i>	ϕ_{em}	<i>Vclm</i>	<i>Netto</i>	ϕ_{em}	<i>Vclm</i>	<i>Swm</i>
BWD-1	8.0	2.5	13.6	42.9	2.5	13.6	42.9	73.2
FRA-1	58.8	40.7	15.0	32.7	17.6	17.5	30.8	74.5
HAW-1	169.5	115.5	12.7	35.7	23.2	16.5	32.5	84.5
HRL-1	98.5	83.3	18.5	31.7	80.3	18.8	31.4	58.6
OIS-1	124.5	107.0	13.2	25.9	3.4	16.6	33.2	85.4
RPL-1	24.0	15.8	14.9	21.2	8.2	15.9	32.7	75.0
SLK-1	99.0	70.7	11.2	38.6	0.0	–	–	–
VLO-1	190.5	158.3	16.0	22.4	5.3	14.4	38.4	85.8
ZDW-1	81.0	78.8	17.9	17.8	78.6	17.9	17.8	49.5
L12-2	35.0	15.0	14.0	6.2	0.0	–	–	–

Appendix G

Show, status en testgegevens Vlieland Zandsteen

Debiet gas (Q50) in 1000 m³/dag;
debiet water in liters/uur. Voor de
betekenis van de overige symbolen zie
appendix D.

<i>Put</i>	<i>Show</i>	<i>Status</i>	<i>Test</i>	<i>Interval</i>	<i>Opbrengst</i>	<i>Debiet</i>	<i>Rw</i>
BWD-1	–	D&A	–				
FRA-1	gas	GAS	DST2	1776 -1779	W	53	0.0590 (20)
			PRP1	1741 -1747	G	52	
					W	15	
			PRP2	1750 -1765	W		
HAW-1	–	D&A	–				
HRL-1	gas	GAS	DST2	1690.5-1702.3	G & W		200
			DST3	1679.5-1702.3	G & W		
			FIT	1694.5-1699.5	W		
			PRP	1679.5-1702.3	G		
OIS-1	–	D&A	–				
RPL-1	–	D&A	DST1	2220.4-2238.0	–		
SLK-1	–	D&A	FIT	2141 & 2142	–		
VLO-1	–	D&A	–				
ZDW-1	gas	GAS	PRP1	1938 -1944	G		530
			PRP2	1871.5-1944	G		
L12-2	–	D&A	DST2	2372.5-2393	W		0.0424 (24)

- Athy, F. (1930) *Density, porosity and compaction of sedimentary rocks*. AAPG Bulletin, vol. 14, p. 1–24.
- Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (in druk) *Inversion Tectonics in the Northwest German Basin*.
- Baldschuhn, R. & Jaritz, W. (1977) *Korrelation der Bohrlochdiagramme und des Kernmaterials*. Geologisches Jahrbuch, A38, p. 7–9.
- Baldschuhn, R., Frisch U. & Kockel, F. (1985) *Inversionsstrukturen in NW Deutschland und ihre Genese*. Z. dt. Geol. Ges., bd.136, p. 129–139.
- Best, G. (1989) *Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwestdeutschland und in der südlichen deutschen Nordsee nach Bohrlochmessungen*. Z. dt. Geol. Ges., bd.140, p. 73–85.
- Betz, B., Fürher, F., Greiner, G. & Plein, E. (1987) *Evolution of the Lower Saxony Basin*. Tectonophysics, vol. 137, p. 127–170.
- Blanche, J.B. (1973) *The Rotliegendes Sandstone Formation of the United Kingdom sector of the Southern North Sea Basin*. Trans. Inst. Min. Metal., Sect.B, Appl. Earth Sc., vol. 82, p. B85–B89.
- Brennand, T.P. (1975) *The Triassic of the North Sea*. In: Petroleum and the Continental Shelf of Northwest Europe (Woodland, A.W. ed.), vol. 1, Geology, Applied Science Publishers, Barking, p. 295–311.
- Brüning, U. (1986) *Stratigraphie und Lithofazies des Unteren Buntsandsteins in Südniedersachsen und Nordhessen*. Geologisches Jahrbuch, A 90, p. 3–125.
- Chadwick, R.A. (1986) *Permian, Mesozoic and Cenozoic structural evolution of England and Wales in relation to the principles of extension – and inversion tectonics*. In: Atlas of onshore sedimentary basins of England (Whittaker, A. ed.), Blackie & Son Ltd, Glasgow, p. 9–26.
- Cottençon, A., Parant, B. & Flacelière, G. (1975) *Lower Cretaceous gas fields in Holland*. In: Petroleum and the Continental Shelf of North West Europe (Woodland A.W. ed.), Applied Science Publishers, Barking, p. 121–137.
- Crittenden, S. (1987) *The 'Albian transgression' in the Southern North Sea Basin*. Journal of Petroleum Geology, vol. 10(4), p. 395–414.
- Dixon, J.E., Fitton, J.G. & Frost, R.T.C. (1981) *The tectonic significance of Post-Carboniferous igneous activity in the North Sea Basin*. In: Petroleum Geology of the Continental Shelf of NW-Europe (Illing, L.V., Hobson G.D. eds.), Heyden & Son, London, p. 121–137.
- Donovan D.T. & Jones E.J.W. (1979) *Causes for world-wide changes in sea level*. Journ. Soc. London, vol. 136, p. 187–192.
- Fertl, W.H. (1987) *Log-derived evaluation of shaly clastic reservoirs*. Journ. Petr. Techn., February 1987, p. 175–194.
- Fisher, M.J. (1984) *Triassic*. In: Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea (Glennie, K.W. ed.), Blackwell, Scientific Publications, Oxford, p. 113–132.
- Glennie, K.W. (1972) *Permian Rotliegend of North-Western Europe, interpreted in the light of modern desert sedimentation studies*. AAPG Bulletin, vol. 56, p. 1048–1071.
- Glennie, K.W. (1983) *Lower Permian Rotliegend desert sedimentation in the North Sea area*. In: Developments in Sedimentology (Brookfield & Ahlbrandt eds.), vol. 38, Elsevier, Amsterdam, p. 521–541.
- Glennie, K.W. (1986) *The structural framework and the Pre-Permian history of the North Sea area*. In: Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea (Glennie K.W. ed.), Blackwell Scientific Publications, Oxford, Second edition, p. 25–62.
- Glennie, K.W. (1986) *Early Permian – Rotliegend*. In: Introduction to the Petroleum geology of the North Sea (Glennie K.W. ed.), Blackwell Scientific Publications, Oxford, Second edition, p. 63–85.
- Glennie, K.W. (1986) *Development of N.W. Europe's Southern Permian Gas Basin*. In: Habitat of Palaeozoic gas in N.W. Europe (Brooks, J., Goff, J.C. & Van Hoorn, B. eds.), Geol. Soc. Spec. Publ., No. 23, Scot. Ac. Press Ltd., Edinburgh, p. 3–22.
- 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*. Sed. Geology, vol. 35, p. 43–81.
- 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: Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea (Glennie, K.W. ed.), Blackwell Scientific Publications, 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 Applied Sc. Publ. for Inst. of Petroleum, London, p. 413–427.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. & Vail, P.R. (1987) *Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic*. Science, vol. 235, p. 1156–1167.
- Herngreen, G.F.W. & Wong, Th.E. (1989) *Revision of the 'Late Jurassic' stratigraphy of the Dutch Central North Sea Graben*. Geologie en Mijnbouw, vol. 68(1), p. 73–105.
- Herngreen, G.F.W., Smit, R. & Wong, Th.E. (in druk) *Stratigraphy and Tectonics of the Vlieland Basin, The Netherlands*. In: Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons. Proceedings 1st Conference European Association of Petroleum Geoscientists, Berlin, May 29th-June 2nd, 1989. Oxford University Press.
- Herrmann, A.G. (1981) *Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten*. Aufschluss, vol. 32, p. 45–72.
- Heybroek, P. (1974) *Explanation to tectonic maps of The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 53(2), p. 43–50.
- Ince, D.M. (in druk) *Clastic diagenesis towards predictive models*. In: Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons. Proceedings 1st Conference European Association of Petroleum Geoscientists, Berlin, May 29th-June 2nd, 1989. Oxford University Press.
- Kennedy, W.J. & Odin, G.S. (1982) *The Jurassic and Cretaceous time scale in 1981*. In: Numerical dating in stratigraphy (Odin, G.S. ed.), Part I, Wiley & Sons, Chichester, p. 557–592.
- Kulick, J. & Paul, J. (1987) *Zur Stratigraphie und Nomenklatur des Zechsteins, Glossar*. Int. Symp. Zechstein 1987, p. 25–34.
- Letsch, W.J. & Sissingh, W. (1983) *Tertiary stratigraphy of The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 62(2), p. 305–318.
- Lorentz, V. & Nicholls, I.A. (1976) *The Permo-Carboniferous Basin and Range province of Europe. An application of plate tectonics*. In: The Continental Permian in Central, West, and South Europe (Falke, H. ed.), Reidel Publishing Company, Dordrecht, p. 313–342.
- Marie, J.P.P. (1975) *Rotliegendes stratigraphy and diagenesis*. In: Petroleum and Continental Shelf of Northwest-Europe (Woodland, A.W. ed.), vol. 1, Geology, Applied Science Publishers, Barking, p. 205–211.
- Moody-Stuart, N. (1966) *High- and low-sinuosity stream deposits, with examples from the Devonian of Spitsbergen*. Journal of Sediment Petrology, vol. 36, p. 1102–1117.
- Nagtegaal, P.J.C. (1979) *Relationship of facies and reservoir quality in Rotliegendes desert sandstones, Southern North Sea region*. Journal of Petroleum Geology, vol. 2, no. 2, p. 145–158.
- NAM & RGD (1980) *Stratigraphic nomenclature of The Netherlands*. Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnb. Gen., deel 32, 77 pp.
- Pallatt, N., Wilson, J. & McHardy, B. (1984) *The relationship between permeability and the morphology of diagenetic illite in reservoir rocks*. Journ. Petr. Techn., December 1984, p. 2225–2227.
- Paul, J. (1982) *Der Untere Buntsandstein des Germanischen Beckens*. Geologische Rundschau, 71, 3, p. 795–811.
- Perrot, J. & Van der Poel, A.B. (1987) *Zuidwal – a Neocomian gas field*. In: Petroleum Geology of North West Europe (Brooks, J. & Glennie, K.W. eds.), Graham & Trotman, London, vol. 1, p. 325–335.
- Pitman, W.C. (1978) *Relationship between eustasy and stratigraphic sequences on passive margins*. Geol. Soc. Am. Bull., no. 89, p. 1389–1403.
- Plomp, A.N. & Geluk, M.C. (1988) *Marginal deposits of the Zechstein evaporite basin (Upper Permian), The Netherlands*. Abstracts 9th European Regional Meeting IAS, Leuven, p. 172–174.
- Raymer, L.L., Hunt, E.R. & Gardner, J.S. (1980) *An improved sonic transit time-to-porosity transform*. SPWLA 21st Ann. Log. Symp. Trans., Paper P.
- Read, H.H. & Watson, J. (1975) *Introduction to Geology, Volume 2; Earth History, part II Later Stages of Earth History*. The Macmillan Press, London, 371 pp.
- Rebelle, M. (1986) *Sédimentologie, Géochimie et Palynologie du bassin évaporitique du Zechstein à partir de données de sub-surface (Mer du Nord, Hesse-R.F.A.-)*. Doc. no. 8, Laboratoire de géologie du Museum, Paris, 301 pp.

- Rijks Geologische Dienst (1984a) *Geologische en Hydrogeologische inventarisatie van Tertiaire en Onder-Kwartaire afzettingen in Noord-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water*. Rapport no. 84 KAR08ex, project BP10371.
- Rijks Geologische Dienst (1984b) *Inventarisatie van slecht-doorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vasteland*. Rapport no. OP6009.
- Sclater, J.G. & Christie, P.A.F. (1980) *Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin*. J. Geophys. Res., vol. 85, p. 3711–3739.
- Schröder, B. (1982) *Entwicklung des Sedimentbeckens und Stratigraphie der klassischen Germanischen Trias*. Geologische Rundschau, 71, 3, p. 783–794.
- Seemann, U. (1979) *Diagenetically formed interstitial clay minerals as a factor in Rotliegend sandstone reservoir quality in the Dutch sector of the North Sea*. Journal of Petroleum Geology, vol. 1(3), p. 55–62.
- Stäuble, A.J. & Milius, G. (1970) *Geology of Groningen gas field, Netherlands*. In: Geology of giant petroleum fields (Halbouty, M.T. ed.), AAPG Memoir 14, p. 359–369.
- Stille, H. (1924) *Grundfragen der vergleichenden Tektonik*. Bornträger, Berlin, 443 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 Publications, Oxford, Second edition, p. 86–111.
- 't Hart, B.B. (1969) *Die Oberjura- und Unterkreide sedimentation in den nördlichen und östlichen Niederlanden*. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, vol. 22, no. 5, p. 253–261.
- Trümphy, R. (1971) *Stratigraphy in mountain belts*. Q. Jl. Geol. Soc. London, 126, p. 293–318.
- Vail, P.R. & Todd, R.G. (1981) *Northern North Sea Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy*. In: Proceedings Petroleum Geology of the Continental Shelf of NW-Europe (Illing, L.V. & Hobson, G.D. eds.), Heyden & Son, London, p. 216–235.
- 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, MNNSS/12, p. 1–12.
- Van Adrichem Boogaert, H.A. (1976) *Outline of the Rotliegend (Lower Permian) in the Netherlands*. In: The continental Permian in Central, West, and Southern Europe (H. Falke ed.), Proc. NATO Advanced Study Inst., Series C, vol. 22, Reidel Publ.Comp., Dordrecht, p. 23–27.
- Van Adrichem Boogaert, H.A. & Burgers, W. (1983) *The development of the Zechstein in The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 62(1), p. 83–92.
- Van den Bosch, W.J. (1983) *The Harlingen Field, the only gasfield in the Upper Cretaceous Chalk of The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 62(1), p. 145–156.
- Van Hoorn, B. (1987) *Structural evolution, timing and tectonic style of the Sole Pit inversion*. Tectonophysics 137, p. 239–284.
- Van Lith, J.G.J. (1983) *Gas fields of Bergen concession, The Netherlands*. Geologie en Mijnbouw, vol. 62(1), p. 63–74.
- Van Wijhe, D.H. (1987) *Structural evolution of inverted basins in the Dutch offshore*. Tectonophysics, no. 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(1), p. 3–24.
- Walker, R.G. (1967) *Formation of red-beds in ancient and modern deserts*. Bull. Geol. Soc. Am., 85, p. 633–638.
- Wolburg, J. (1967) *Zur Wesen der Altkimmerische Hebung, mit einem Überblick über die Muschelkalk und Keuper-Entwicklung in Nordwest-Deutschland*. Z. dt. Geol. Ges., vol. 119, p. 516–523.
- Wolburg, J. (1969) *Die epirogene Phasen der Muschelkalk und Keuper-Entwicklung in Nordwest-Deutschland, mit einem Rückblick auf den Buntsandstein*. Geotekt. Forsch. 32, p. 1–65.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. & Gardner, L.W. (1956) *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media*. Geophysics, vol. 21(1), p. 41–70.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. & Gardner, L.W. (1958) *An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media*. Geophysics, vol. 23(3), p. 459–493.
- 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, 130 pp.

Ziegler, P.A. (1987) *Late Cretaceous intra-plate compressional deformations in the Alpine foreland a geodynamic model*. Tectonophysics, 137, p. 389–420.

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

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

- RGD 1964 Dijkstra, S.J., & Romein, B.J. *Verslag onderzoek van diepboring Terschelling-1*. Rapport no. GB-898.
- RGD 1965 Patijn, R.J.H. *Determination of the core-cut Placid International, Harlingen-West-1*. Rapport no. GB-962.
- RGD 1973 Bless, M.J.M. *Rapport aangaande miosporen diepboring L12-1A*. Rapport no. GB-1325.
- RGD 1985a Schuurman, H.A. & Lissenberg, T. *Stratigrafische interpretatie van het Mesozoïsche gedeelte van boring HH 34 (Oude-Inschot-1)*. Rapport Micropal Mesozoïcum no. 433.
- RGD 1985b Van de Laar, J.G.M. *Revisie van het Karboon uit diepboringen Warmerhuizen-Krabbedam-1, Den Burg-1, Q8-1 en M11-1, op basis van miosporen*. Rapport no. GB-2069.
- RGD 1985c Van de Laar, J.G.M. *Revisie van het Karboon uit diepboringen Terschelling-South-1, Bergen-1A, Oude Inschot-1, IJsselmeer-1, M8-1 en M10-2*. Rapport no. GB-2078.
- RGD 1987 Van de Laar, J.G.M. *Revisie van het Karboon uit diepboring Zuidwal-2*. Rapport no. GB-2155.
- RGD 1988a Geel, C.R. *Logcorrelaties binnen de Chalk Groep in NW Nederland*. Rapport no. 88KAR18.
- RGD 1988b Van de Laar, J.G.M. *Revisie van het Karboon uit diepboring Den Burg-1, m.b.v. miosporen*. Rapport no. GB-2215.
- RGD 1988c Van de Laar, J.G.M. *Revisie van het Karboon uit diepboring Meep-1, m.b.v. miosporen*. Rapport no. GB-2218.
- RGD 1989a Geluk, M.C. & Parker, N. *Geologie van de Trias afzettingen in het kaartblad Texel-Purmerend (kaartblad IV)*. Rapport no. 89KAR17.
- RGD 1989b Pagnier, H.J.M. *Correlatie en interpretatie van een aantal boringen die het Carboon bereikt hebben, in het kader van de diepe kartering van kaartblad I*. Rapport no. GB-2252.
- RGD 1989c Witte, L. & Schuurman, H.A. *Stratigrafische (her)interpretatie van het Boven Krijt in boring UW-31 (Zuidwal-02)*. Rapport Paleontologie Mesozoïcum no. 107b.
- RGD 1989d Witte, L. *Onderzoek naar de biostratigrafische betekenis van op grond van logkarakteristieken onderscheiden eenheden in het Boven Krijt van noordwest Nederland*. Rapport Paleontologie Mesozoïcum no. 487.
- RGD 1990a Herngreen, G.F.W. *Boven-Jura–Onder-Krijt stratigrafie van het Vlieland Bekken*. Rapport Paleontologie Mesozoïcum no. 2213.
- RGD 1990b Ramaekers, J.J.F. *Petrofysica Boven-Rotliegend Groep Kaartblad I*. Rapport no. 90KAR09.
- RGD 1990c Ramaekers, J.J.F. *Petrofysica Vlieland Zandsteen Kaartblad I*. Rapport no. 90KAR10.

¹ Interne Rapporten van de Rijks Geologische Dienst zijn in het algemeen niet voor derden beschikbaar.

Geologische Kaarten

De kaarten zijn samengesteld door

T. Stavenga met medewerking van E.J.Th. Duin en G. Remmelts

Vormgeving

A. Walkeuter

Kartografie

Europees Cartografisch Instituut, Zoetermeer

Druk

Haagse Drukkerij, Den Haag

Toelichting

De tekst van de toelichting bij de kaarten is samengesteld uit bijdragen van

M.C. Geluk

A. Lokhorst

J.J.F. Ramaekers

G. Remmelts

R. Smit

Figuren

D. Moeliker

Vormgeving

BRS Premisela Vonk, Amsterdam

Druk

Sdu Den Haag

Algehele leiding

A. Lokhorst t/m 1990

Th.E. Wong sinds 1991

Copyright

Rijks Geologische Dienst,
Haarlem 1991

Behoudens uitzondering door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming 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, hetgeen ook van toepassing is op de gehele of gedeeltelijke bewerking. 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 72 869 079

Deze publikatie kan worden aangehaald als

RGD, 1991 – Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting bij blad I:
Vlieland-Terschelling, Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Deze publikatie is eveneens verkrijgbaar in een Engelstalige versie, ISBN 90 72 869-10-9.
This publication is also available in English, ISBN 90 72 869-10-9.

