

De zoutkoepel van blok K9

René Giesen en Chris Mesdag

In de Nederlandse ondergrond komen enkele tientallen zoutbergen voor. Hierbij kan het zout dikten van enkele kilometers bereiken. Meestal worden deze Zechstein-structuren afgedekt door enkele honderden meters sediment. Een structuur, voorkomend onder de Noordzee, op ca 80 km ten westen van Den Helder, blijkt echter flink "doorgeschoten" te zijn. Zij nadert de zeebodem tot op nog geen twee meter. Als gevolg van de gemakkelijke bereikbaarheid kan aan deze structuur detailonderzoek plaatsvinden. Er hoeft immers bij boringen of geofysische metingen geen dik pakket afdekend gesteente gepasseerd te worden.

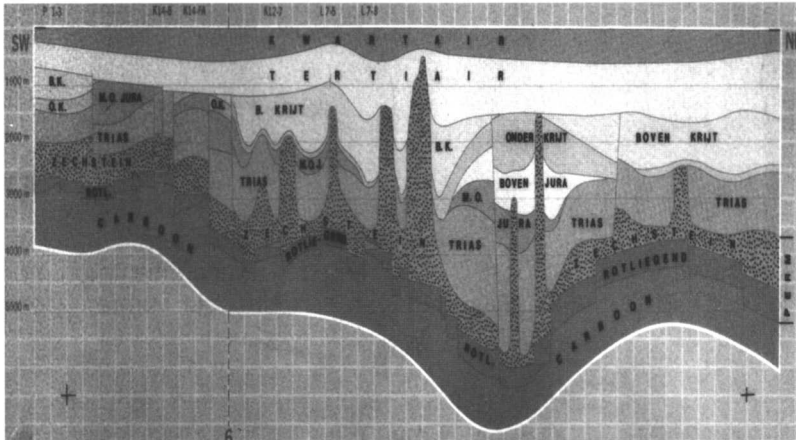


Fig. 1. Geologische doorsnede met daarin zoutstructuren.

Geologie

Aan het eind van het Paleozoïcum (zie geologische tijdtabel fig. 3), in het Perm (zo'n 250 miljoen jaar geleden) zijn zowel het on- als offshore gebied

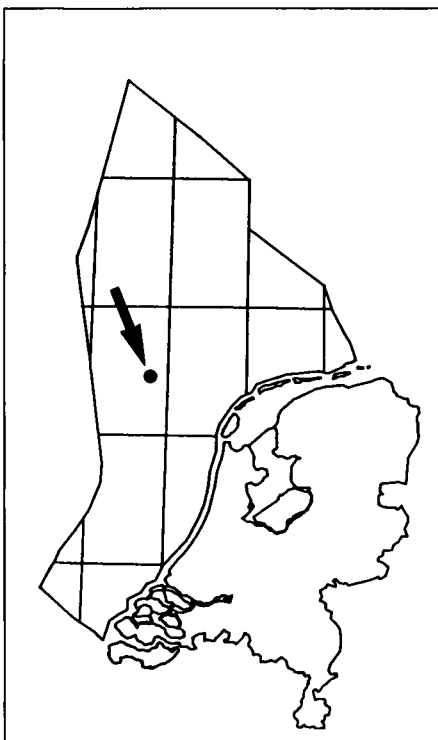


Fig. 2. Ligging van de zoutstructuur in blok K9.

van noordelijk Nederland deel van het uitgebreide Zechstein-bekken (fig. 4). Ten gevolge van indamping zijn onder een constante aanvoer van zeewater van buiten het bekken, dikke evaporietlagen afgezet. Deze evaporieten bestaan voornamelijk uit K, Na en Mg zouten, waarvan met name NaCl (keukenzout) ruim is vertegenwoordigd. Naast deze zouten maken ook dolomiet en anhydriet deel uit van de evaporieten. Anhydriet kennen we overigens beter als "gips". Deze Zechstein-lagen bereiken in het centrum van het bekken dikten van enkele honderden meters. Het betrokken gebied is vervolgens gedurende het merendeel van de hierop volgende tijd blijven dalen, waardoor er ook in het Mesozoïcum en Kenozoïcum dikke lagen zijn afgezet, die voornamelijk bestaan uit zanden, kleien en carbonaten. Deze sedimenten zijn soms weer vrij snel verdwenen door erosie tijdens perioden van stijging van het bekken. Echter,

Geologische tijdtabel met samengestelde stratigrafische kolom van Nederland en het Continentaal plat					
Tijd in miljoenen jaren	Hoofd-tijdperk	Periode	Tijdvak	Groep of Formatie	
2.4	KENOZOÏCUM	Kwartair	Neogeen	Boven-Noordzee	
				Midden-Noordzee	
			Paleogeen	Onder-Noordzee	
65	MESOZOÏCUM	Krijt	Boven-Krijt	Ommelanden	
				Tessin	
				Holland	
			Onder-Krijt	Vlieland	
				Diverse formaties	
143	Jura	Boven-Jura	Brabant		
		Midden-Jura	Werkendam		
		Onder-Jura	Aalburg		
208	Trias	Boven-Trias	Slaen		
		Midden-Trias	Keuper		
		Onder-Trias	Muschelkalk		
245	Perm	Boven-Perm	Zechstein		
		Onder-Perm	Boven-Rotliegend		
290	CARBOON	Stafanien	Boven-Rotliegend		
			Westfaalien	Limburg	
			Namuren		
		Dinantien	Carboniferous Limestone	Farne	
363	PALEOZOÏCUM	Devon			
409					
439			Siluur		
510			Ordoviciem		
570	PRECAMBRIUM	Cambrium			

Fig. 3. Geologische tijdtabel.

het netto resultaat van de erosie en sedimentatie is een sedimentpakket van soms meerdere kilometers dikte.

Dat het sedimentpakket een variëren-

de dikte heeft is enerzijds een gevolg van tektonische bewegingen vanuit het basement, maar ook van een verschijnsel dat bekend staat als zoutvloeï. Dit laatste verschijnsel vormt de zoutbergen, zoals de K9 structuur.

Mechanisme van zoutvloeï

Door hun zeer geringe samendrukbaarheid behouden zouten, wanneer zij begraven worden, een relatief geringere dichtheid dan het omringende sedimentgesteente. Dit laatste ondergaat wel een flinke compactie. Als gevolg hiervan ontstaat een opwaartse druk die het gemakkelijk plastisch vervormbare zout het dekmateriaal binnendringt en er zelfs doorheen doet breken. Hierbij stroomt het zout zijdelings toe, met als gevolg het ontstaan van een ondergrondse zoutberg of zoutkoepel (fig. 5). Dat het zout op een bepaalde positie doorbreekt, heeft te maken met de aanwezigheid van zwaktezones in het dekmateriaal, eventueel veroorzaakt door breuken. Breuken in het gesteente onder het zout kunnen ook als "trigger" werken en een verstoring van het evenwicht veroorzaken. Niet zelden komt onder

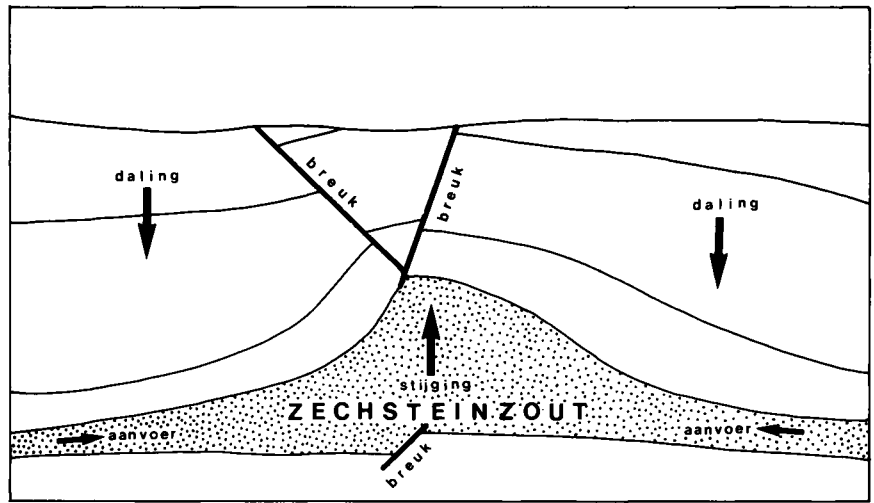


Fig. 5. Ontstaan van zoutstructuren. In zwaktezones breekt het zout door het oorspronkelijk afdekkende gesteente. Door aanvoer van opzij ontstaat het grote volume aan zout.

een zoutberg een breuk voor. Naar alle waarschijnlijkheid wordt de opwaartse beweging van het zout ook beïnvloed door een meer regionale zijdelingse druk. Dus door de gebergten en bekkenvormende bewegingen van de aardkorst. Wanneer de Zechsteinzouten in contact komen met aanwezig grondwater, worden de goed oplosbare zouten afgevoerd en ontstaat

een aanrijking van slecht oplosbare anhydrieten en dolomieten. Een "gips-hoed" kan de bovenste tientallen meters van een structuur vormen. Deze laag is niet altijd aanwezig. Is er geen of te weinig water beschikbaar om het zout af te voeren, dan kan het zout aan de oppervlakte komen. Dit komt bijvoorbeeld voor in landen met een droog klimaat als Spanje. Ook in onze

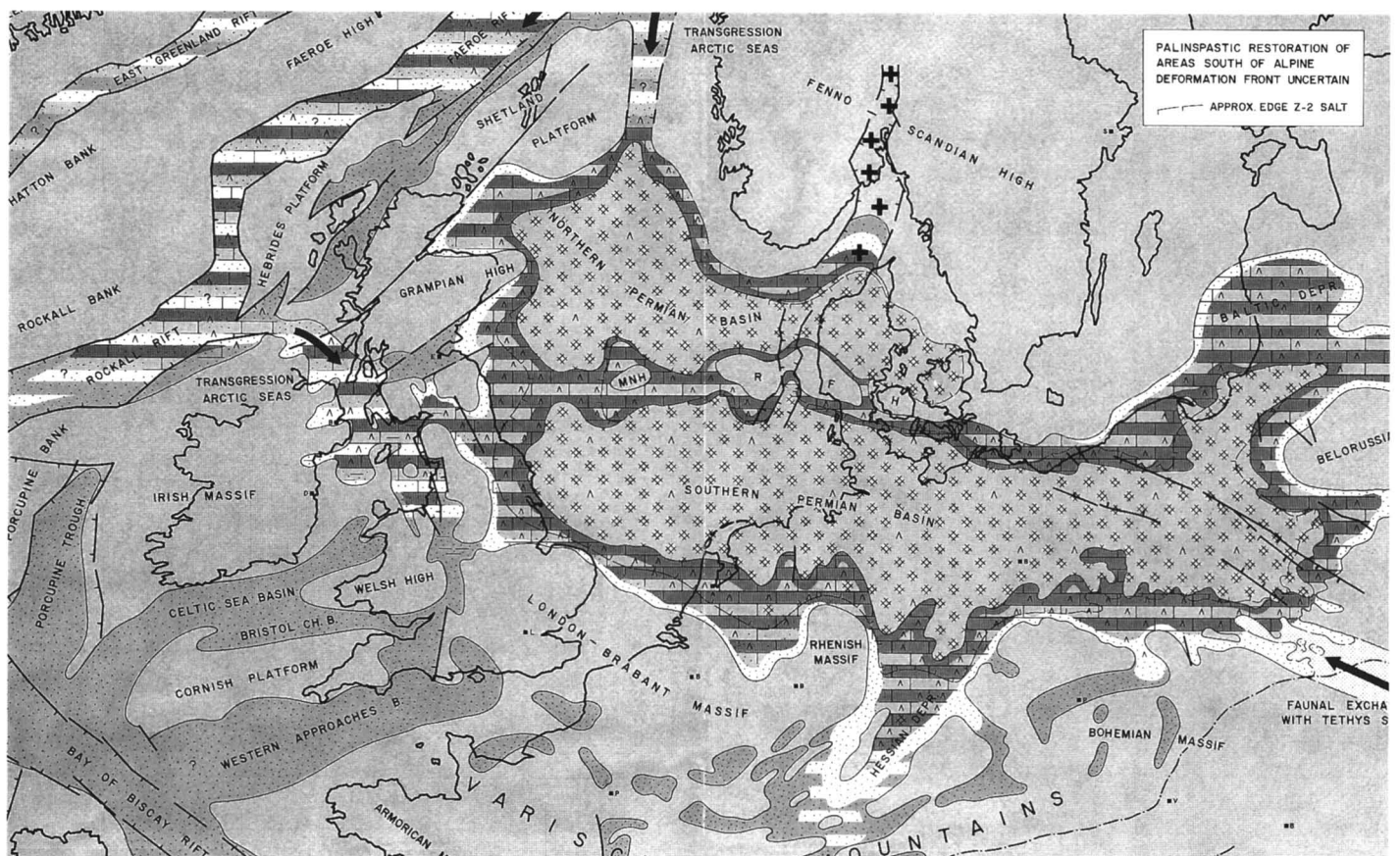


Fig. 4. Ligging van het Zechstein-bekken. Op de kaart is de ligging van het noordelijke en zuidelijke Perm-bekken, waarin het Zechstein-zout is afgezet, aangegeven. (Uit: Ziegler, P.A. 1982. Geological atlas of Western and Central Europe, Elsevier Publ., Amsterdam pp. 130).

omgeving is dit in bepaalde geologische perioden voorgekomen. De vorming van de zoutkoepel heeft hier in K9, geresulteerd in een langerekte kegelvormige zoutklomp in de ondergrond met een gronddoorsnede van 4 bij 6 km en een hoogte van 3,5 km. Uit de gegevens blijkt dat deze structuur recent nog actief is geweest. Op grond hiervan kan worden aangenomen dat ze nu nog steeds actief zal zijn, omdat de omstandigheden niet noemenswaard veranderd zijn.

Basisgegevens

Voor onderzoek aan de structuur zijn verschillende seismische doorsneden beschikbaar met ieder voor zich een bepaald dieptebereik en precisie. Daarnaast is uit de omgeving informatie beschikbaar van diepe boringen (van oliemaatschappijen) ten behoeve van de gasexploratie en van een vier-tal, enkele meters diepe, RGD boringen.

Seismiek

Seismologie berust op een meetmethode die reeds tientallen jaren in gebruik is. De methode is de laatste jaren door de mogelijkheden die computers bieden hoog ontwikkeld. Hoewel de manier waarop de metingen verkregen en verwerkt worden zeer gekompliceerd is, is het principe ervan vrij simpel. Bij de methode wordt gebruikgemaakt van laagfrequentie ge-

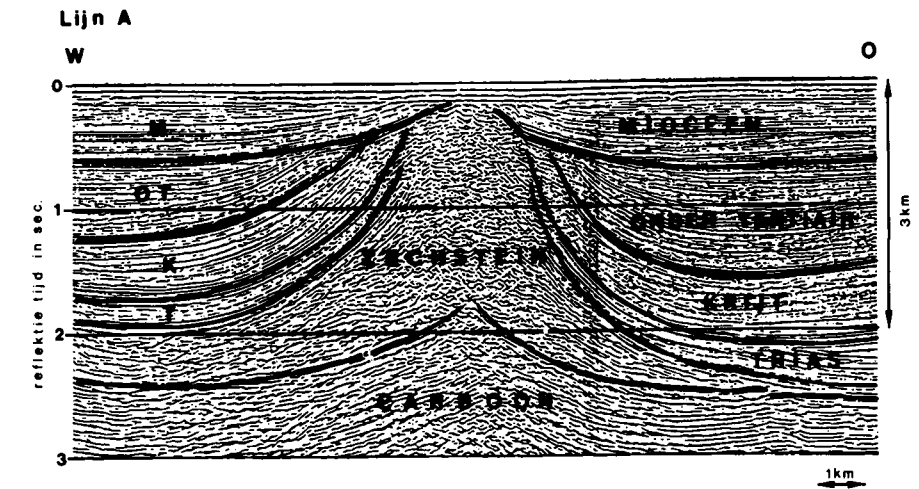


Fig. 7. Lijn A. Deze west-oost doorsnede toont de gehele structuur, in afmetingen van kilometers bij kilometers.

luidsgolven (20 tot 200 trillingen per seconde). Deze worden aan de oppervlakte opgewekt met behulp van springstoffen of op zee mechanisch (met airguns en waterguns). Vervolgens worden met geofoons of hydrofoons -dit zijn in wezen microfoons- de terugkerende echo's uit de ondergrond opgenomen. Verandert de dichtheid of snelheid van het gesteente niet, dan plant de geluidsgolf zich voort, met een voor een bepaald gesteente karakteristieke snelheid. Verandert echter de karakteristieke snelheid of dichtheid, dan wordt op het vlak waarop de verandering optreedt

een gedeelte van de golfenergie weerkaatst. We krijgen dan een echo. Door meerdere geluidsignalen te combineren krijgen we een in reflektietijd uitgedrukt beeld van dichtheids- en snelheidsveranderingen in de ondergrond. Aangezien dichtheids- en snelheidsveranderingen samenhangen met de geologische structuur hebben we dus een beeld van de ondergrond (fig. 6).

Het dieptebereik en de precisie waarmee geologische structuren kunnen worden weergegeven zijn afhankelijk van de frequentie van de geluidgolven. Met lage frequenties kom je diep, maar heb je weinig detail. Gebruik van hoge frequenties geeft een meer gedetailleerd beeld, maar het bereik is ondiep.

Dataverwerking

De seismiek over K9 structuur bestaat uit 3 sets doorsneden met een west-oost of zuid-noord richting. Per set hebben de signalen een gemiddelde frequentie van 50 Hertz, 200 Hertz resp. 3.5 KiloHerz. Er kan dus beginnend met een algemeen beeld "ingezoomd" worden (fig. 7 lijn A, fig. 8 & 10 lijnen Ba en Bb resp. fig. 11 lijn Ca). Hierbij zijn de doorsneden in reflektietijd gegeven.

Lijn A (fig. 7). Deze betreft een lijn opgenomen ten behoeve van de olie- en gasexploratie. Zij geeft bruikbare informatie van 200 milliseconden tot 3 seconden. Dit betekent tot diepten van ongeveer 200 m respectievelijk 4,5 km. Op deze west-oost doorsnede zijn enkele belangrijke geologische ho-

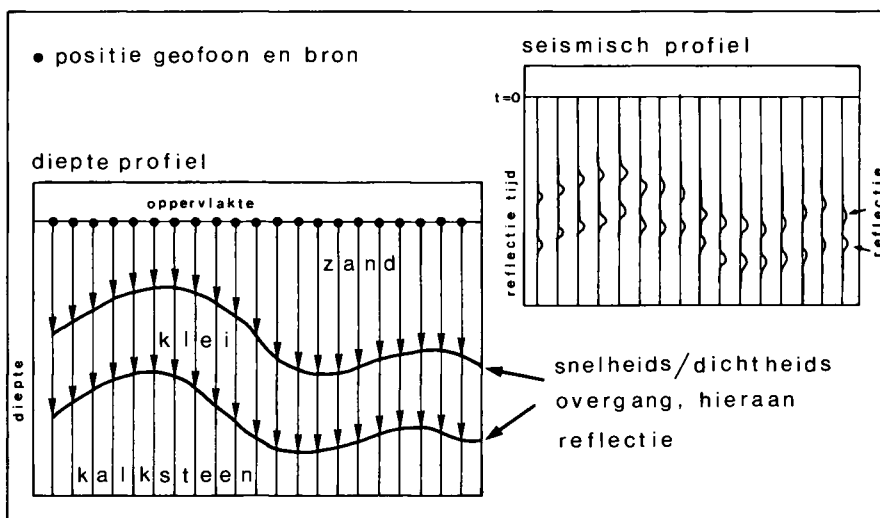


Fig. 6. Principe van de seismiek. Aan de oppervlakte worden signalen opgewekt die in de ondergrond bij snelheids- of dichtheidsovergangen teruggekaatst worden. Deze reflecties worden vertikaal uitgezet. De snelheids- en dichtheidsovergangen correponderen met de geologische structuur.

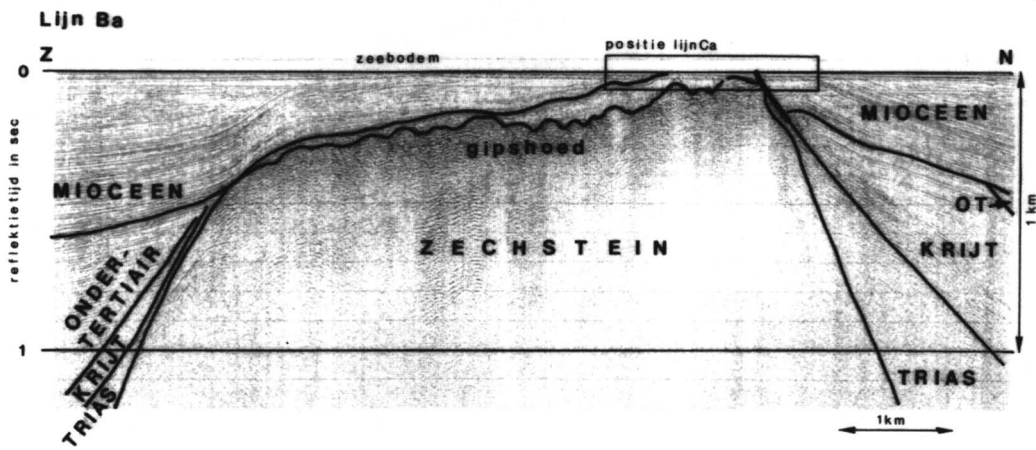


Fig. 8. Lijn Ba. Een noord-zuid doorsnede die de bovenste honderden meters van de structuur toont.

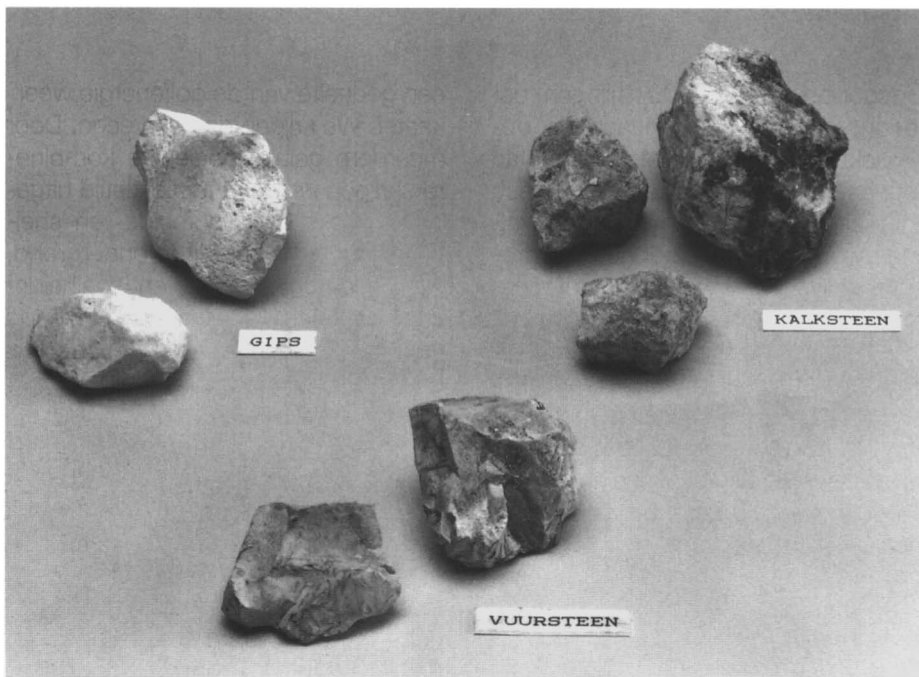


Fig. 9. Stukjes vuursteen, kalk en gips uit het materiaal dat direkt onder de Holocene deklaag voorkomt.

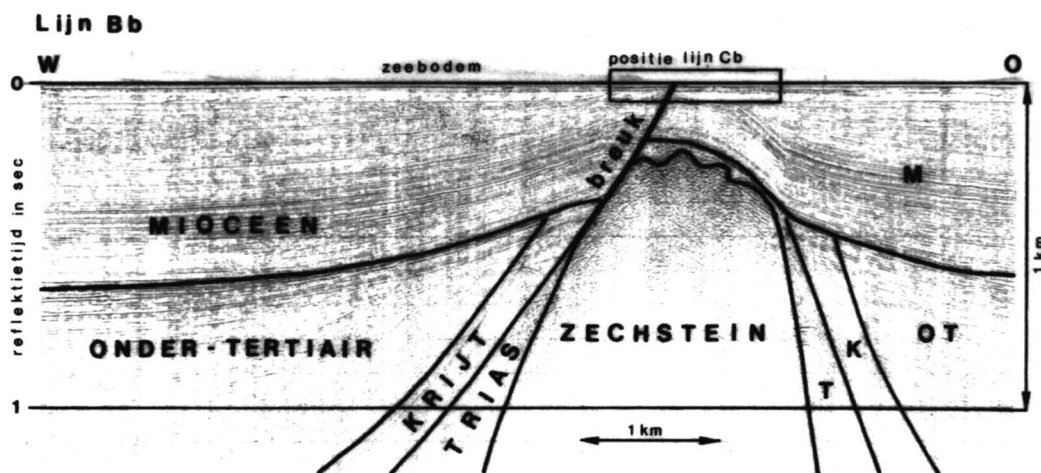


Fig. 10. Lijn Bb. Een west-oost doorsnede die de bovenste honderden meters van de structuur toont.

rizons weergegeven. Deze zijn bepaald op grond van een diepe maatschappijboring geprojecteerd op een seismische lijn. Op de doorgebroken top van het Zechstein na betreffen de horizonts steeds de basis van eenheden. Hiervan vertonen met name de basis Krijt en de basis Mioceen een goed te onderscheiden hoekdiscordantie. Duidelijk waarneembaar is het diep insnijden van de pre-Krijt erosie in de Triassische lagen. Hieruit kan worden

geconcludeerd dat de evenwichtsverstoring in de Zechstein-lagen reeds voor het Krijt heeft plaatsgevonden. Aan het dunner worden van de formaties in de richting van de zoutstructuur zien we dat de stijging hiervan min of meer continue de begraving tracht bij te houden in een streven naar evenwicht. Rekenen we de reflektietijd om in diepte dan volgt er uit dat er boven de zoutkoepel meer dan 3000 m sediment ontbreekt dat wil zeggen is geërodeerd, dan wel niet afgezet. Als gevolg hiervan komen binnen pakketten hierdoor diepte verschillen tot 2500 m voor. Het opwellen van de basis-Zechstein-reflektor wordt overigens veroorzaakt door de hogere seismische snelheden van de Zechstein evaporieten. Daardoor ontstaat een geringere reflektietijd.

Lijnen Ba/b (fig. 8, 10). Meer detail wordt getoond in deze lijnen. Zij geven ook informatie over diepten van minder dan 200 m. Hierop is, voor zover nog aanwezig, de basis-Mioceen-reflektor goed te vervolgen. De lijn Ba (fig. 8) loopt zuid-noord, evenwijdig aan de lengteas van de structuur. Op deze lijn zien we, hoe de basis-Mioceen-reflektor de basis-Tertiair-reflektor afsnijdt en zo doodloopt tegen de zeebodem. Boven de zoutkoepel bevindt zich tussen de basis van het Mioceen en de top van het Zechstein maximaal een honderd meters materiaal dat ouder is dan Tertiair, maar jonger dan Zechstein. Een sterke reflector komt vlak onder de zeebodem voor met een andere polari-

teit dan de zeebodemreflector. Dat die de Zechstein weergeeft, en wel de gipshoed, wordt door een ondiepe RGD-boring bevestigd. Deze bracht naast stukjes vuursteen en kalk, gips aan de oppervlakte (fig. 9). Uit de reflecties van de gipshoed blijkt, dat deze opgebroken is in blokken van enkele honderden meters. Deze blokken vertonen onderling breuken van enkele tientallen meters

Op deze lijn en op de lijn Bb (fig. 10), een west-oost doorsnede is een (groei)breuk vast te stellen in de Mioceen en jongere pakketten. Het verzet bedraagt hier ongeveer 200 m voor de basis van het Mioceen. De breuk lijkt tot op de zeebodem te vervolgen. Deze breuk is ook op andere lijnen min of meer goed waarneembaar. Het verzet is afhankelijk van de resterende dikte van het Mioceen (en jongere) materiaal. Deze breuk lijkt in het horizontale vlak op een winkelhaak. Gezien de aard van de breuk zal ze zich langs de flanken van de zoutkoepel naar een aanzienlijke diepte voortzetten.

Lijnen Ca/b (fig. 11 en 13). Overstappen op deze lijnen maakt het onderscheiden van nog veel meer detail mogelijk, maar het gaat nog meer ten koste van het dieptebereik. Op deze seismiek zijn details te zien met een dikte van minder dan een meter, maar het dieptebereik bedraagt nauwelijks meer dan 15 m. Het meest interessant is lijn Ca (fig. 11), die zich op dezelfde positie bevindt als lijn Ba, dus zuid-noord. Een gedeelte hiervan, over het minst ondiepe gedeelte van de top van de structuur is hier weer gegeven. Op lijn Ba is aangegeven

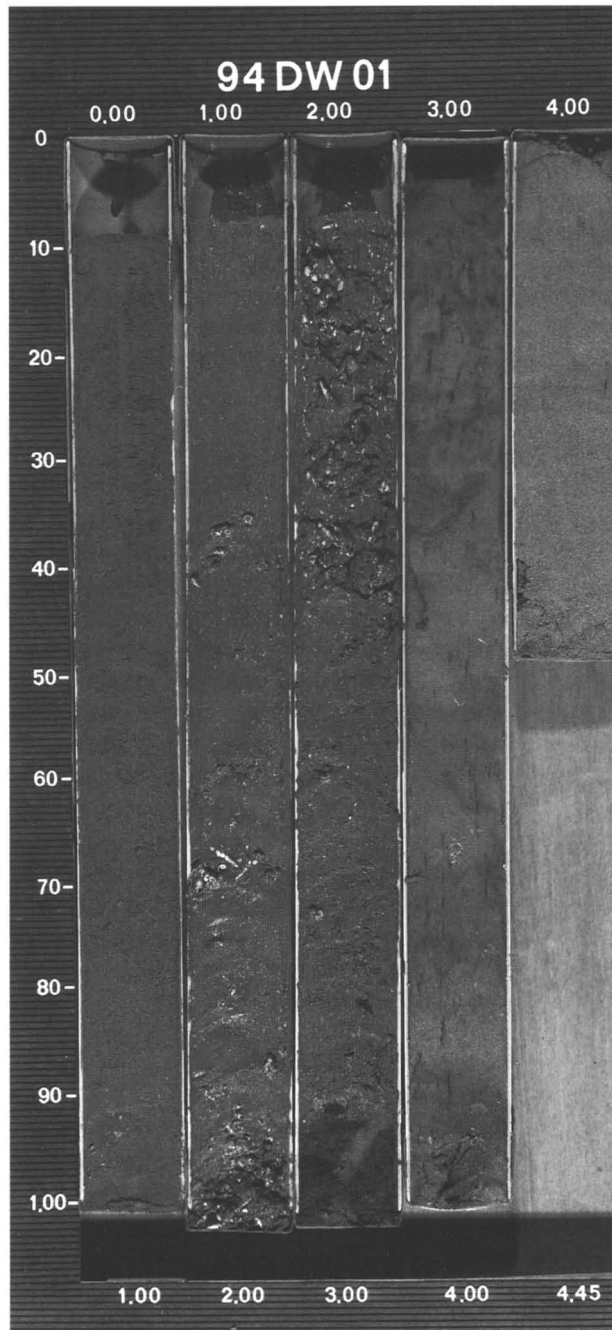


Fig. 12. Opname van een ondiepe boring. We zien een vier meter lange kern van het Holoceen met daarin het basisveen op ongeveer 2.92 m. Onder het basisveen de oudere lagen met verticale doorworteling, hetgeen erop wijst dat het veen autochtoon is.

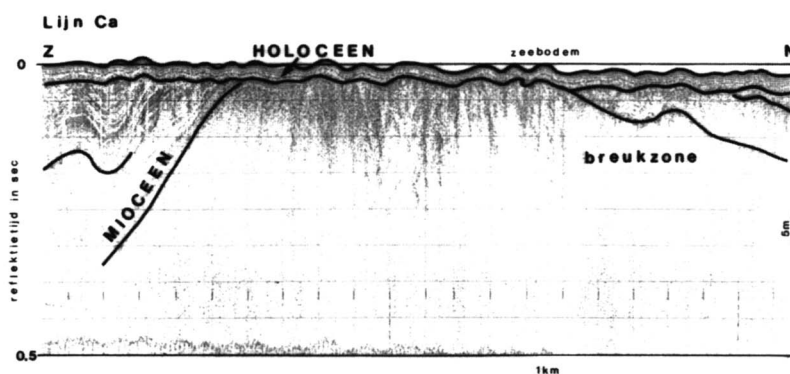


Fig. 11. Lijn Ca. Een zuid-noord doorsnede op de plaats waar de structuur het dichtst onder de oppervlakte voorkomt. Deze doorsnede laat de ongeveer bovenste tien meters zien. De opgeduwde lagen ter weerszijde van de structuur zijn goed zichtbaar. De ligging van de doorsnede is op de lijn Ba (fig. 8) aangegeven.

waar lijn Ca hiermee samenvalt. Op deze ultrahoge resolutieseismiek is waar te nemen, dat er een laag van enkele meters dikte hoekdiskordant op een laag eronder ligt. Op grond van met betrekking tot dit gebied aanwezige kennis is de bovenste laag tot het Holoceen gerekend. Dit is bevestigd door de ondiepe boringen (fig. 12). Op de dikte van dit Holoceen, dat overigens ook regionaal dikteveranderingen vertoont, is de invloed van de zoutbeweging duidelijk aantoonbaar. Gaande van noord naar zuid zien we hoe de laag boven de uiterste top van de zoutkoepel aanzienlijk dunner is

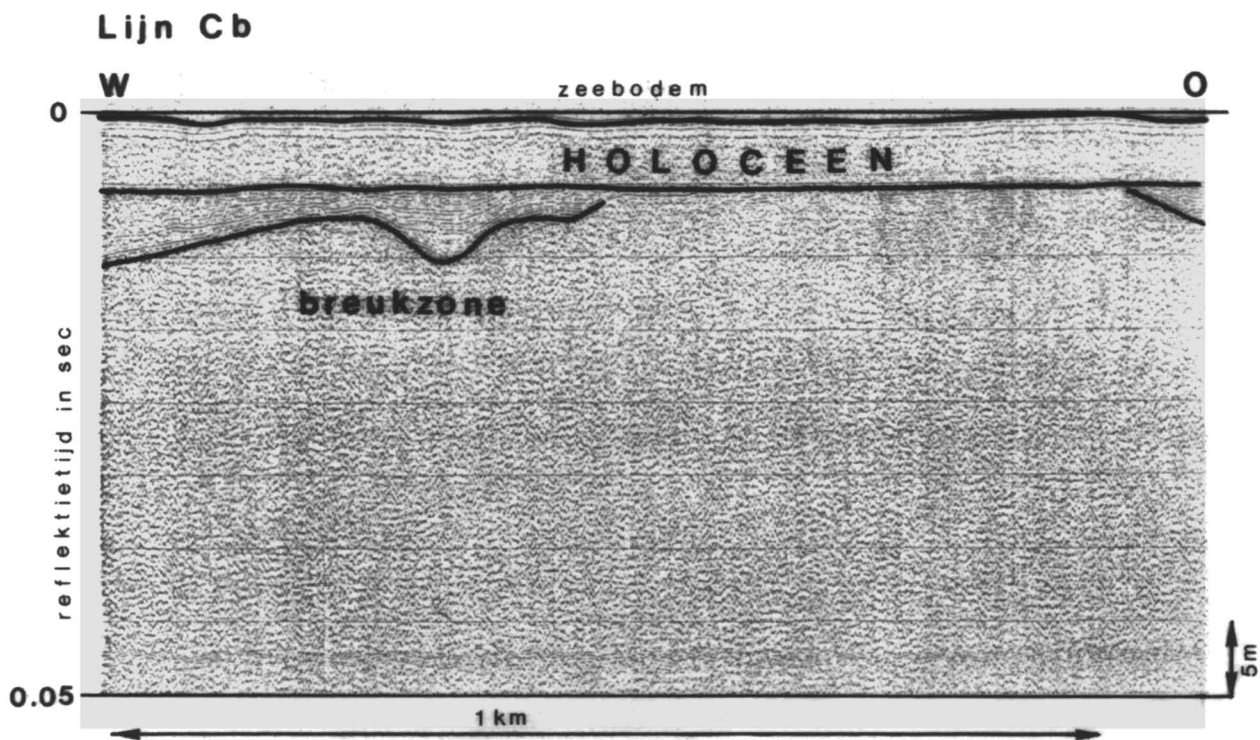


Fig. 13. Lijn Cb. Een west-oost doorsnede van de structuur toont de bovenste tien meters. De ligging van deze doorsnede is aangegeven op lijn Bb (fig. 10). Goed zichtbaar is de breukzone die met de breuk op lijn Bb correspondeert.

dan ter weerszijden ervan. Gecorrigeerd voor de regionale veranderingen is een reductie in dikte tot zo'n 70% waar te nemen, dit houdt in dat er 2 m aangetroffen wordt in plaats van 3 m. Oorzaak hiervan is het verminderd tot afzetting komen van materiaal boven de structuur, die overigens beslist niet door een hogere ligging van de zeebodem tot uiting komt. De geringere dikte zal een gevolg zijn van een streven naar evenwicht tussen groei van de zoutberg en afzetting, in relatie tot de omgeving. Dat de top en basis van het Holoceen golven vertonen is een gevolg van bewegingen van het opnamevaartuig, dus niet van geologische structuren. Deze golven zijn ook in de diepere reflecties waarneembaar.

Daar waar op basis van de hoge resolutielijn Ba, de basis-Mioceen-reflektor verwacht wordt, is op deze lijn een begrenzing in seismische expressie waar te nemen. Links op de lijn zijn de golvende pre-Holocene reflecties te zien die in het algemeen gezien dezelfde hoek maken als de basis-Mioceen-reflektor. Rechts is pas daar structuur zichtbaar waar de top van de zoutkoepel ophoudt. De hellingrichting van de lagen onder het Holoceen is hier ook tegengesteld aan die

van links. De hoekdiskordantie is goed te zien. We zien dus aan weerszijden van de top de lagen wegduiken, terwijl boven de top van de structuur onder de Holoceen-reflektor niets waarneembaar is. Reden hiervan zal naar alle waarschijnlijkheid het chaotische karakter van dit gesteente zijn, dat het seismisch signaal absorbeert in plaats van terugkaatst. Ook de lijn Cb (fig. 13) laat een interessant fenomeen zien. Deze lijn ligt nagenoeg op dezelfde positie als lijn Bb. Hebben we al op de lijn Bb gezien dat de breuk tot ongeveer de zeebodem te vervolgen is, hier kunnen we in detail zien wat er gebeurt, over ongeveer de laatste tien meter. De breuk eindigt onder de Holoceen-reflektor in een anticlinale trog. Minder uitgesproken is dit verschijnsel ook op de noord-zuid lijn Ca te zien.

Tot besluit

De bedoeling van dit onderzoek is, enkele zaken uit te zoeken met betrekking tot een type structuur die over het algemeen slecht ontsloten is. Daarvoor blijkt deze structuur zich uitstekend te lenen. Er is nu informatie aanwezig over de opbouw van de gipshoed en het gedrag van een zoutkoepel in het recente verleden. Met name de invloed op de Holocene afzettingen is interessant. Als bijkomend

gegeven bestaat er nu een nieuwe verklaring voor de herkomst van onder, ingespoeld materiaal dat in boringen wordt aangetroffen. Dat kan namelijk heel goed afkomstig zijn van door stuwend zout aan de diepe erosie blootgestelde lagen.

Summary

In the Dutch offshore block K9 seismic surveys for hydrocarbons revealed a salt dome very close to the seabed surface. This occurrence offers a unique opportunity for investigation on such kind of structure, which usually is less well exposed. Seismic surveys have been carried out using frequencies of 50 Hertz, 200 Hertz and 3,5 Khertz, each frequency with its own penetration and resolution. Moreover, a number of shallow borings has been made. The seismic data disclose the built-up of the structure into detail, whereas the borings penetrated through the Holocene cover into the rock. Rock fragments of flint, gypsum and calcareous material.

Adres van de auteurs
Postbus 157
2000 AD Haarlem