

**Differentiële bodemdaling als
gevolg van compactie in de ondiepe
tot matig diepe ondergrond van
Ameland-Oost**

2009-U-R91011

Denise Maljers
Albert Oost
Ane Wiersma
Ger de Lange
Ronald Harting

Titel

Differentiële bodemdaling als gevolg van compactie in de ondiepe tot matig diepe ondergrond van Ameland-Oost

Opdrachtgever
Nederlandse Aardolie
Maatschappij



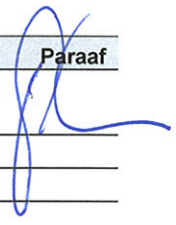
Kenmerk
0013

Pagina's
26

Samenvatting

Onderzocht is of de ondiepe tot matig diepe ondergrond (tot ca. 200m –NAP) differentiële bodemdaling tot gevolg kan hebben op Ameland-Oost. De ondergrond is in kaart gebracht gebruikmakend van boorgegevens, van het Digitaal Geologisch Model van TNO en historische bronnen. Uit deze gegevens kan afgeleid worden dat er in de bovenste 5 m maximaal 1.5 tot 2 m aan compacteerbare eenheden aanwezig is, en dat dieper in de Holocene sequentie nogmaals 2 m kan voorkomen. De compacteerbare Pleistocene eenheden zijn kleien van de Eem Formatie, kleien van de Formatie van Urk en potkleien van de Formatie van Peelo. De compacteerbare eenheden samengenomen van zowel Holocene als Pleistocene eenheden geeft een mogelijke maaiveld daling van tussen de < 0.6 en 2.5 mm per jaar. Deze range is mede zo groot omdat onvoldoende bekend is waar de kleilagen zich in het Holoceen bevinden en er dus rekening gehouden moet worden met diverse scenario's van voorkomen. De gegeven daling geldt voor het maaiveld wat de daling van de peilmerken is, is onbekend, omdat we niet weten waarop deze gefundeerd zijn.

Projectnummer
092.91011

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	2009-02-11	Denise Maljers		Aleid Bosch		Michiel van der Meulen	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Vraagstelling en aanpak	2
2.1 Vraagstelling	2
2.2 Aanpak	2
3 Achtergronden	3
3.1 Inleiding	3
3.2 Bodemdaling	3
3.3 Bodemdalingsmodel	3
3.4 Metingen	4
3.5 Verschil metingen en voorspellingen	5
4 Lithologisch onderzoek	6
4.1 Holocene opbouw van Ameland-Oost	6
4.1.1 Holocene afzettingen op basis van beschikbare boorgegevens	6
4.1.2 Ontwikkeling van Ameland in het Laat-Holoceen op basis van historische gegevens	7
4.1.3 Holocene sedimenten zoals afgeleid uit de historische ontwikkeling	10
4.2 Pleistocene opbouw van Ameland-Oost	12
4.3 Samenvatting	14
4.3.1 Schatting van de dikte van de Holocene compacteerbare eenheden op basis van boorgegevens	14
4.3.2 Schatting van de dikte van de Holocene compacteerbare eenheden op basis van historische gegevens	14
4.3.3 Schatting van de dikte van de Pleistocene compacteerbare eenheden	14
5 Zettingskarakteristieken	15
5.1 Inleiding	15
5.2 Holocene afzettingen	15
5.3 Pleistocene afzettingen	16
5.4 Totaal aan maximaal mogelijke daling	16
6 Conclusies	17
7 Referenties	19
Bijlage(n)	
A Locatiekaart aangeleverd door NAM	21
B Ondiep profiel	22
C Matig diep profiel door DGM	23

1 Inleiding

De NAM heeft een geomechanisch model opgezet om de bodemdaling ten gevolge van de gasproductie van de Amelandse gasvelden te voorspellen. Een vergelijking van de modelresultaten met de geobserveerde daling op peilmerken laat echter zien dat de groep van peilmerken aan de westkant van de bodemdalingskom sterker is gedaald dan gemodelleerd.

Gevraagd is om een oriënterend onderzoek uit te voeren naar een mogelijke verklaring voor dit afwijkende zakkingsgedrag in Ameland-Oost op grond van de opbouw van de ondiepe tot matig diepe ondergrond (Kwartair).

Het studiegebied ligt op Ameland, oostelijk van Buren. Het gebied is ongeveer 11 kilometer lang (Fig. 1.1) en bestaat uit duinen, stuifdijken, kwelders, polders en zandplaten. Voor de winning van het gas werd een gasverwerkingsstation aangelegd op Ameland-Oost in de periode 1983-1985. Daartoe werd zand opgespoten en een duinval aangelegd. Sinds 1986 wint de NAM gas op Ameland-Oost. Hierdoor ontwikkelde zich over de jaren een bodemdalingsschotel waarvan het centrum op het eiland ligt.



Figuur 1.1: Oostelijk deel van Ameland met de belangrijkste toponymen (Bron: Google): 1 = Nes; 2 = Buren; 3 = Buurdergrie; 4 = Buurderduinen; 5 = Kooi; 6 = Kooi-Oerdstuifdijk; 7 = Nieuwlandsreid; 8 = Oerderduinen; 9 = NAM-locatie; 10 = Hon; 11 = Pinkegat.

2 Vraagstelling en aanpak

2.1 Vraagstelling

De NAM heeft een geomechanisch model opgezet om de bodemdaling ten gevolge van de gasproductie van de Amelandse gasvelden te voorspellen. Een vergelijking van de modelresultaten en de observaties van peilmerken laat een grotere daling dan gemodelleerd zien over een beperkt gebied in oostelijk Ameland, aan de westkant van de bodemdalingsskom. NAM heeft opdracht gegeven aan Deltares om een oriënterend onderzoek uit te voeren naar mogelijk differentieel zakkingsgedrag in Ameland-Oost met een oorzaak in de opbouw van de ondiepe tot matig diepe ondergrond (Kwartair).

2.2 Aanpak

Het onderzoek is in de volgende 2 fasen uitgevoerd.

1. **Lithologisch onderzoek**

De lithologische variatie in het Amelandse **Holoceen** zal worden bekeken op basis van de combinatie van beschikbare boringen, seismiek en onze kennis van de afzettingsgeschiedenis. Speciale aandacht gaat uit naar het voorkomen van compacteerbare eenheden, zoals kleiige afzettingen.

De lithologische variatie in het **Pleistoceen** zal worden geëvalueerd op basis van het DGM (landelijk Digitaal Geologisch Model van TNO, celgrootte 250 bij 250 m, versie 1.1) en beschikbare boringen. Speciale aandacht gaat hierbij uit naar de kleiige opvulling van subglaciale tunneldalen op enkele tientallen meters diepte en de bovenliggende fluviaatiele en mariene kleien, die mogelijk verantwoordelijk kunnen zijn voor laterale variatie in zettingsgedrag.

2. **Inschatting zettingsgedrag**

Indien verschillen in compacteerbare eenheden in Holoceen en Pleistoceen zijn geïdentificeerd, zal met de combinatie van (theoretisch) zettingsgedrag en geschatte laagdikte worden nagegaan of het verschil in gemodelleerde en gemeten daling er qua grootteorde en lokalisering aan kan worden toegeschreven.

Op basis van de resultaten van bovenstaande fasen wordt in overleg met NAM in een later stadium besloten om een eventueel vervolgonderzoek te formuleren.

3 Achtergronden

3.1 Inleiding

Over de periode 1986-2006 treedt een afwijking op van de gemodelleerde bodemdaling ten opzichte van de gemeten bodemdaling voor een aantal peilmerken westelijk van RD X coördinaat 190000 (Bijlage 1).

Hieronder volgt een korte toelichting over bodemdaling, de gebruikte voorspellingsmodellen en de metingen, op basis van gegevens zoals aangeleverd door NAM.

3.2 Bodemdaling

Het aardgas wordt onder Ameland aangetroffen in zandsteenlagen van de Rotliegend Formatie op zo'n 3000 m – 3500 m. Het gesteente bestaat uit aan elkaar gekitte zandkorrels met plaatselijk klei waartussen zich kleine ruimtes, de poriën, bevinden. In het gasreservoir bevindt zich het gas (en water) in deze poriën onder hoge druk. Het reservoir is afgedekt door ondoorlatende lagen als zout en kleisteen, die ervoor zorgen dat het gas niet naar boven kan ontsnappen.

In een gasveld veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente langzaam iets samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen. Deze zogenaamde compactie hangt af van verschillende factoren, zoals de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente, de grootte van de drukdaling en de dikte van het depleterende reservoir. De mate waarin de compactie wordt omgezet in bodemdaling op maaiveldniveau is afhankelijk van de diepte en omvang van het depleterende gasveld en eigenschappen van de bovenliggende lagen (ref. NAM 1).

3.3 Bodemdalingsmodel

Een geomechanisch model is een belangrijk hulpmiddel om de bodemdaling ten gevolge van gaswinning aan het maaiveld te voorspellen. Bij de NAM wordt reeds vele jaren onderzoek verricht en veldonderzoek gedaan om tot een zo nauwkeurig mogelijke voorspelling van de bodemdaling door gaswinning te komen. Enerzijds is de techniek van het seismologisch onderzoek sterk verbeterd, waardoor de afmetingen en locaties van gasvoerende lagen steeds beter kunnen worden bepaald (3-dimensionale seismiek), anderzijds wordt voortdurend meer kennis verzameld van de gesteente-eigenschappen, waardoor de betrouwbaarheid van de mathematische voorspellingsmodellen de laatste jaren belangrijk is toegenomen.

Vanwege de heterogeniteit van de reservoirs en de complexe geologische structuur, met name van de afdekkende zoutlaag van de Zechstein Formatie, is voor het Ameland Winningsplan (ref. NAM 2) in 2003 de bodemdaling van de Ameland gasvelden Ameland-Oost en Ameland Westgat gemodelleerd met het eindige elementen programma Geomec, een door Shell en TNO ontwikkeld programma met als basis software het eindige-elementen-pakket DIANA van TNO. Zoals reeds in de MER (ref. NAM 3) en rapportages van de meet- en regelcyclus van respectievelijk 2006 en 2007 (ref. NAM 4) is gemeld, wordt de bodemdaling, gemodelleerd met het Winningsplan 2003 geomechanische model, met name in de Waddenzee, significant overschat. NAM heeft een "alternatief" geomechanisch bodemdalingsmodel voor de Ameland velden opgezet dat, met name in de Waddenzee, beter

overeenkomt met de gemeten bodemdaling op de peilmerken sinds begin van de productie in 1986.

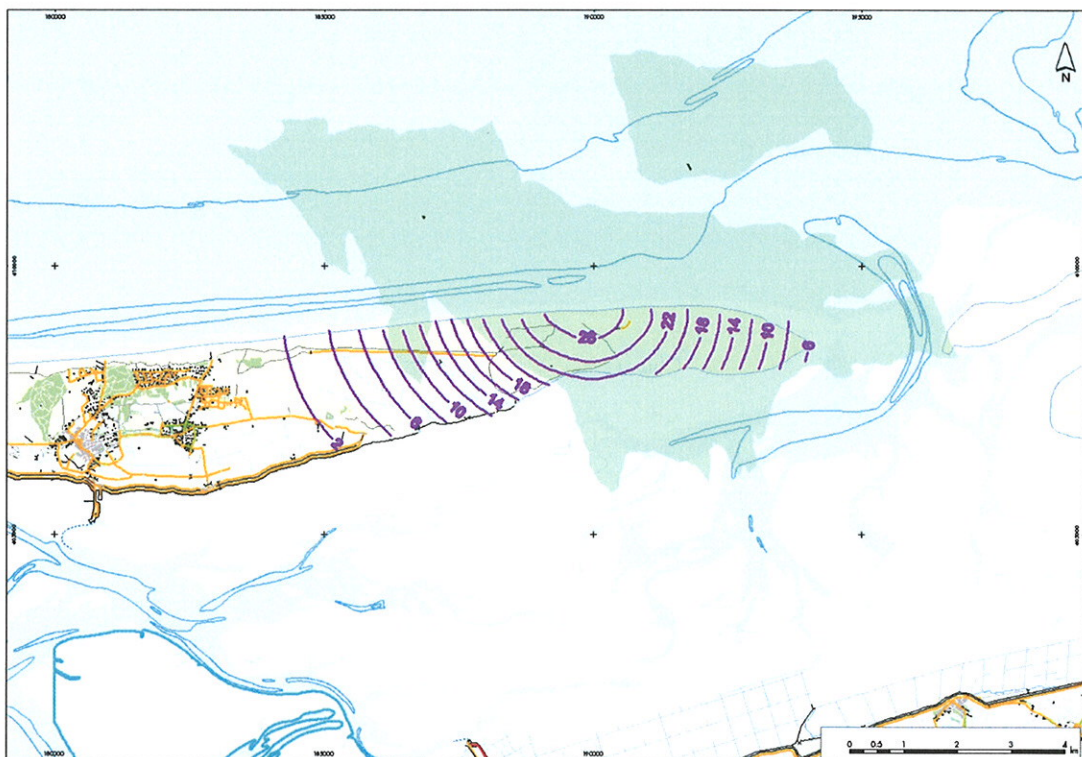
Het nieuwe eindige-elementen-model van Ameland is gekalibreerd met de gemeten bodemdaling op de peilmerken sinds de start van de productie in 1986.

3.4 Metingen

Het meetnet is via het ondergrondse merk OA2592 in Nes aangesloten op het NAP-net. De metingen zijn uitgevoerd in opdracht van de NAM volgens de richtlijnen van de Data-ICT-Dienst van Rijkswaterstaat inzake meetwijze en toleranties voor de 2^e orde nauwkeurigheidswaterpassingen.

Na de nulmeting van de punten van een uitgebreid meetnet op Ameland-Oost in maart 1986 zijn, in opdracht van de NAM, jaarlijks nauwkeurigheidswaterpassingen op Ameland-Oost uitgevoerd tot en met februari 1999. Toen is besloten om de nauwkeurigheidswaterpassing niet meer elk jaar uit te voeren, omdat op basis van de beschikbare gegevens via extrapolatie een nauwkeurige voorspelling te maken is van de verdere daling over een korte periode van één of twee jaar. De laatste nauwkeurigheidswaterpassingen zijn uitgevoerd in februari 2007. In 2008 is nog een meting uitgevoerd in het oostelijk deel van het meetnet.

Op grond van de metingen zijn bodemdalingscontouren aan te geven voor de periode 1986-2003 (Fig. 3.1).



Figuur 3.1: Bodemdalingscontouren (in cm) op het eiland Ameland gebaseerd op het verschil in gemeten bodemdaling op de peilmerken 1986-2003 (Ameland Winningsplan 2003).

De peilmerken zijn overwegend strand- en duinpalen van Rijkswaterstaat en eigen geplaatste palen van de NAM, waarvan niet bekend is of ze op een stevige niet-zakkende onderlaag staan. De peilmerken zijn 5 meter lang, waarbij ca. 3,8 m onder het maaiveld steekt. Dit kan inhouden dat ze niet alleen zakken door gaswinning, maar ook door klink van kleirijke en veenrijke pakketten onder de basis van de paal en het meevoeren van de paal door klinkend sediment rondom de paal (zuiging). Hierbij gaat het alleen om natuurlijke klink, en niet over klink als gevolg van bijvoorbeeld wateronttrekking.

3.5 Verschil metingen en voorspellingen

Het geomechanische model is gekalibreerd met de gemeten daling op de peilmerken sinds de start van de gasproductie in 1986. Voor de meeste peilmerken komt de gemodelleerde bodemdaling goed overeen met de gemeten bodemdaling. Echter in het westen van de bodemdalingskom daalt een aantal peilmerken sneller dan gemodelleerd (gebied omcirkeld en aangeduid met "ondiepe compactie?" op Fig. 4.1). Over de periode 1986 – 2007 bedraagt het verschil in gemodelleerde en gemeten bodemdaling op deze peilmerken 3 – 5 cm (e.e.a. afhankelijk van de fine-tuning/kalibratie van de bodemdalingsvoorspellingen).

De overgang tussen het iets sneller zakkende westelijke gebied en het meer stabiele oostelijke gebied is vrij abrupt en wordt gescheiden door RD X coördinaat 190000. Deze studie onderzoekt wat de mogelijke bijdrage van de ondiepe tot matig diepe ondergrond aan deze differentiële bodemdaling kan zijn.

4 Lithologisch onderzoek

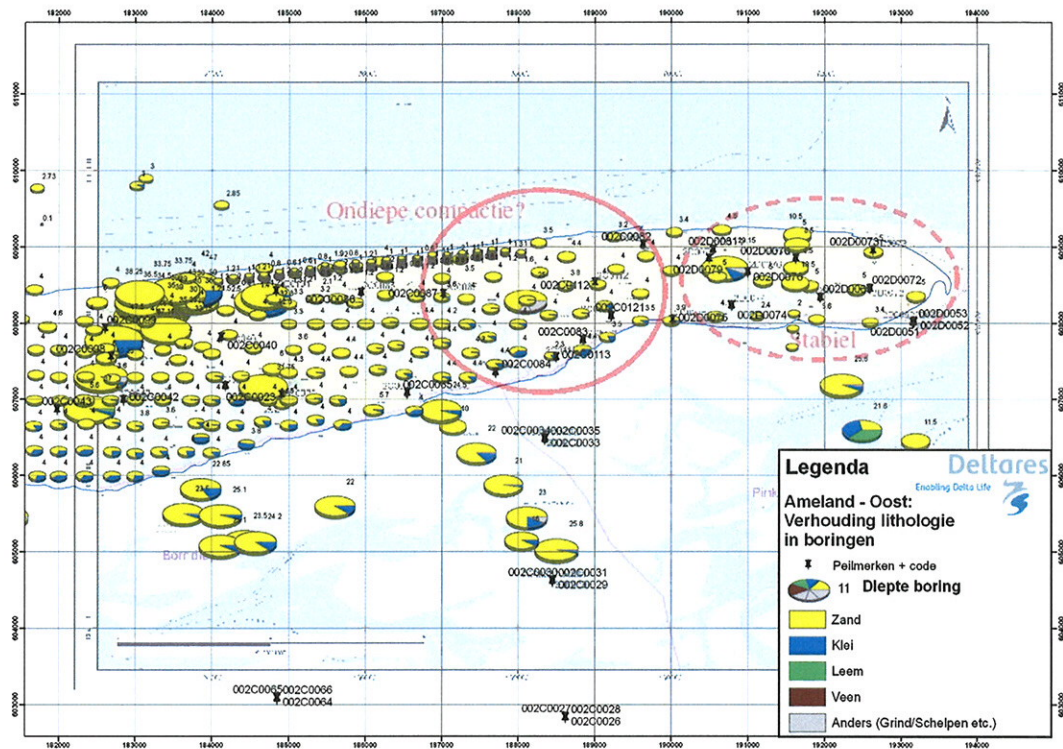
Het lithologisch onderzoek gebeurt door middel van boringen uit de Database Informatie Nederlandse Ondergrond (DINO) en hierop gebaseerde profielen. De ondiepe boorinformatie beperkt zich over het algemeen tot de bovenste 4m. Matig diepe boringen zijn beperkt aanwezig, daarom wordt DGM als aanvullende bron van informatie gebruikt. Ter aanvulling op de boorgegevens en DGM worden systeemkennis en historische bronnen meegenomen in onze analyse om een volledig beeld te kunnen schetsen voor de gehele (Holocene) sequentie.

4.1 Holocene opbouw van Ameland-Oost

4.1.1 Holocene afzettingen op basis van beschikbare boorgegevens

Ten oosten van RD X coördinaat 190000 blijkt op basis van de beschikbare boringen (zie Bijlage 2 en Bijlage 3) dat de Holocene ondergrond van Ameland-Oost overwegend bestaat uit zand met hier en daar een kleilaag en een enkele schelpenlaag. De basis van de afzettingen ligt op een maximale diepte van 25 tot 30 m -NAP. Matig diepe boring B02D0037 laat voor de gehele Holocene sequentie bovengenoemde opbouw zien (zie Bijlage 3).

In het gebied ten westen van RD X coördinaat 190000, en dan met name in Nieuwlandsreid en het zuidelijke deel van de Oerderduinen (zie Fig. 1.1), neemt het klei-aandeel in het ondiepe deel van de ondergrond toe. Deze kleien zijn voornamelijk gevormd in laag energetische kwelder- en plaatmilieus. Duinafzettingen bij de Oerderduinen hebben de kwelder- en plaatafzettingen overstoven. Op basis van de profielen door de boringen in het Holoceen (Bijlage 2) en de taartdiagrammen in Figuur 4.1 zijn schattingen van het percentage klei in de Holocene ondergrond gemaakt voor het gebied ten westen van RD X coördinaat 190000. De ondergrond in het noordelijk profiel bestaat vrijwel volledig uit zand. In het middenprofiel is het klei-aandeel 6% en in het zuidelijk profiel 25%. In het zuidelijke profiel komt dit overeen met een maximale kleidikte van 1.5 à 2 m klei in het getoonde profiel. Klei wordt op grond van kennis over het afzettingmilieu, een kweldermilieu, voornamelijk bovenin verwacht in het zuidelijke gebied (Van der Spek, 1996) zoals ook te zien is op de profielen van Bijlage 2. Onderin de Holocene sequentie zullen met name geul- en wadplaatafzettingen aanwezig zijn. Lokaal zouden kleien ook dieper voor kunnen komen als restgeulafzettingen of als bewaard gebleven oudere kweldersequenties. De kans hierop wordt klein geacht, mede doordat de verwachting is dat door migratie van geulen deze afzettingen veelal herwerkt zullen zijn.



Figuur 4.1: Overzicht peilmerken en de lithologische samenstelling van ondiepe en matig diepe boringen.

4.1.2 Ontwikkeling van Ameland in het Laat-Holoceen op basis van historische gegevens

Ameland-Oost is een gebied dat via historische kaarten en informatie redelijk goed te volgen is in haar ontwikkeling vanaf de 15e, maar vooral vanaf de 17e eeuw. Hieronder volgt een samenvatting van deze ontwikkeling. In paragraaf 4.1.3 worden de implicaties van deze ontwikkeling op de sedimenten in de ondergrond uitgewerkt.

15e eeuw tot en met 18e eeuw

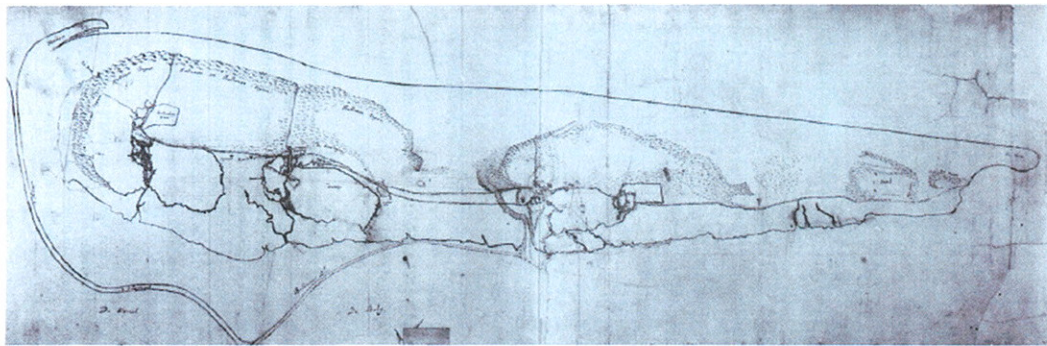
Een van de oudste bronnen die informatie geeft over het gebied is een overeenkomst van 1483 tussen een abt en een visser (Sipma, 1927, no. 236):

21-2-1483: “.... *Up Aemland moegha gheya wrt land fan Nes twischen dae Rijd en(de) den Schulbalgh on hieare(n) toe voermeythien Mer jeklers scil dy abt int land fors. Als twischen dae Rijd en(de) den Sculbalgh dat riucht jeyjen selff haulda ofte toe des claesters profijt verheera ffoerdmaer alla renthen deer ko(m)med fan dae pijnken als foer dae fiske nye...*” (... op Ameland mag (hij) gaan over het land van Nes tussen het Rijd en de Sculbalgh om zich te vermaken. Maar insgelijks zal de abt van het voorzegde land, gelegen tussen Rijd en Sculbalgh dat recht zelf behouden of het verhuren ten behoeve van het klooster, eveneens als alle rechten die komen van het pijnken (vermoedelijk vissen met een pink (vandaar: Pinkegat), als van het vissen...).

De tekst maakt duidelijk dat er oostelijk van Nes een streek is die Rijd (spleet of opening) heet, en hoogstwaarschijnlijk kan worden geïdentificeerd als Nieuwlandsreid, een laagliggend washover-complex tussen Buren en Oerd op Oost-Ameland. Deze is ook zichtbaar als een

gat in de duinen op zijaanzichten van 1558 (kartering 1543-1557) van Cornelis Anthonisz's Caerte van "die Oosterse See".

Het Nieuwlandsreid is goed zichtbaar op de karteringen van Van Deventer (kartering 1536-1545), een anonieme kaart van 1665 (Fig. 4.2) en van Hattinga van 1749 (Fig. 4.3; gebaseerd op eerder werk van 1731). Op de laatste twee kaarten staat het Rijd afgebeeld als een washover-complex, gelegen tussen de twee duincomplexen van Nes-Buren en Het Oerd-Oosterhuizen. Aan de zuidzijde tegen de Waddenzee aan is duidelijk een krekensstelsel en groen aanwezig wat suggereert dat daar een kwelder lag. Noordwaarts daarvan lag een strandvlakte met daarop klaarblijkelijk kleine duinen.



Figuur 4.2: Ameland, ca. 1665, ARA, VTH 3052, kartering waarschijnlijk tussen 1640-1660.

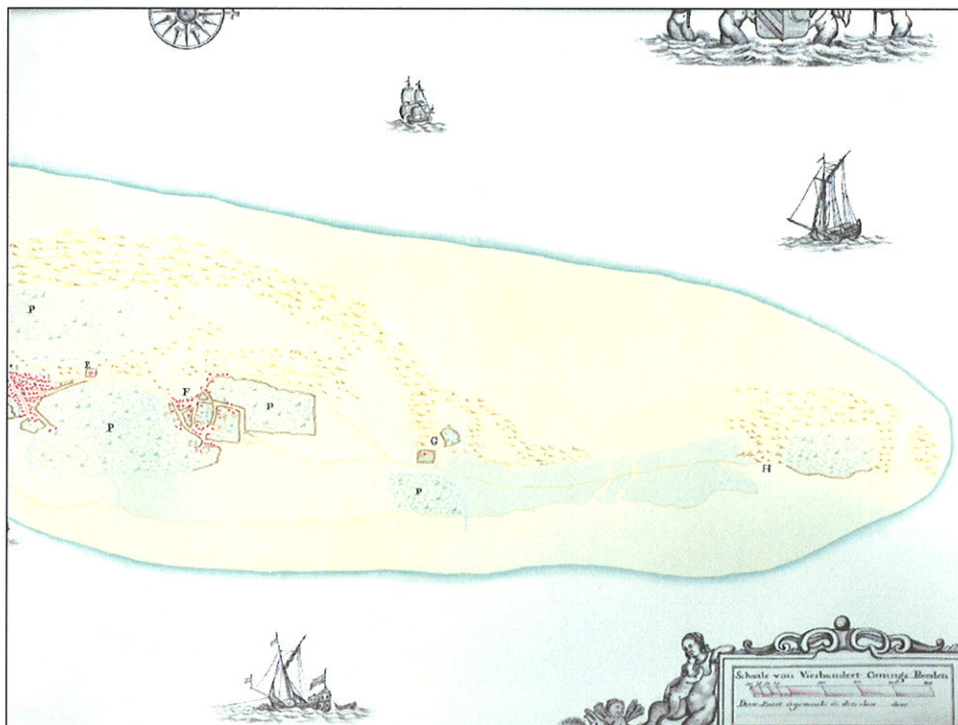


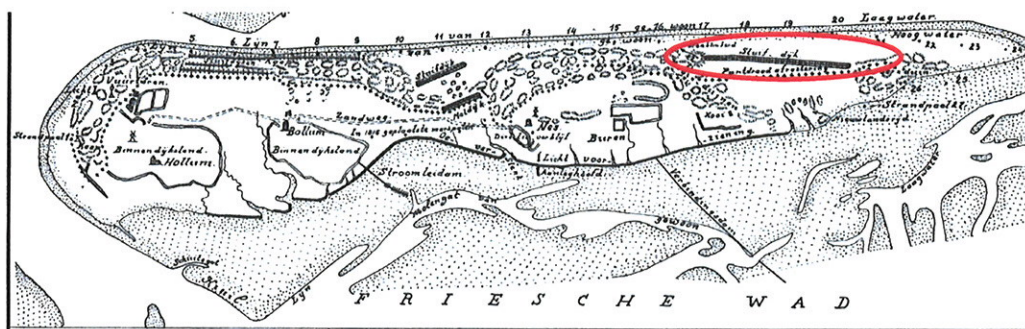
Fig. 4.3: (deel van de) Hattinga kaart, 1749.

Daarnaast blijkt uit deze kaarten dat er land aanwezig is tussen het Rijd en het belangrijkste zeegat oostelijk van Ameland in die tijd, de Scholbalg (Sculbalgh). Hoever dat land zich oostwaarts uitstrekte in de 15e eeuw is niet exact bekend, maar tenminste tot ca. 2 km oostelijk van de oostkant van de huidige Oerder Duinen. Latere bronnen (van Deventer, 1559, kartering 1536-1545; Waghenaer, 1584/85, kartering 1570-1579; Haeyen, 1585, kartering 1580-1584) geven aan dat het zeegat, direct oostelijk van Ameland, het Pinkegat, in deze tijd nog niet of nauwelijks aanwezig was.

Rond 1550 was de lengte van Ameland ca. 22 km, waarbij de hoogwaterlijn aan de oostkant vermoedelijk 3,5 km meer westwaarts lag dan nu (van Deventer, 1559). Dit bleef ongeveer zo tot 1600, waarna een geleidelijke inkorting van de oostkant volgde over 1,5 km tot 1650. Pas vanaf 1750 zou de oostkant weer aan gaan groeien.

Het Pinkegat lijkt pas als zeegat na 1600 aanwezig te zijn. De ontwikkeling van het Pinkegat tot een zeegat moet hoogstwaarschijnlijk in de 16e eeuw worden geplaatst. Cyclisch gedrag lijkt aanwezig, maar kan pas in detail worden gevolgd vanaf 1800 (zie hieronder).

Periode vanaf 1800



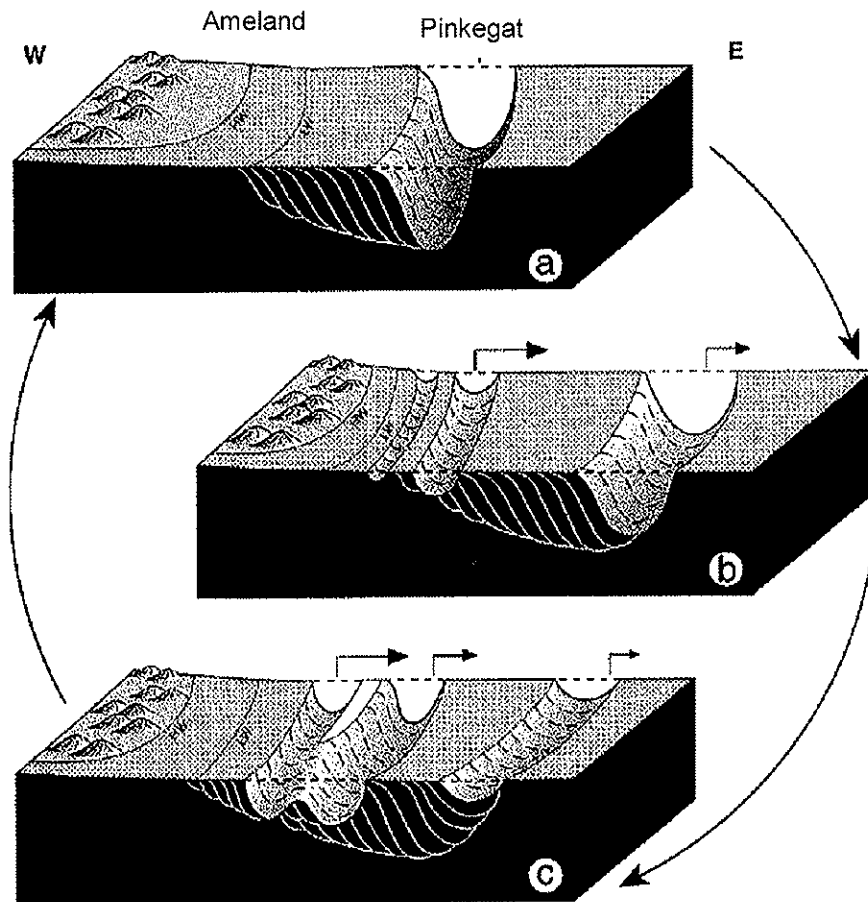
Figuur 4.4: Ameland 1896, met daarop zichtbaar de stuifdijk tussen Nes-Buren en het Oerd (rood omlijnd)

Het Nieuwlandsreid bleef aanwezig tot 1882-1893, toen het gat tussen de duincomplexen van Nes-Buren en Het Oerd werd afgesloten door een stuifdijk aan de Noordzeekant (zie Fig. 4.4), na eerdere pogingen in 1855 en 1880 (Brouwer, 1936; van Oosten, 1986). In de laagte, in de luwte van de stuifdijk ontwikkelde zich een kwelder aan de Waddenzeezijde.

Het land oostelijk van Nieuwlandsreid bleef bestaan uit de Oerderduinen (die tijdens en na de stormvloed van 1825 sterk veranderden en opwaaiden tot het huidige hoge niveau). Daarbij werd de kwelder zuidelijk ervan door duinen (Oerderblinkert) bedekt. Oostwaarts ervan lag een lager gelegen zandige strandvlakte, de Hon. Dit gebied kende een afwisseling van aangroei en afslag, als gevolg van het cyclisch gedrag van het Pinkegat (Fig. 4.5).

Het Pinkegat laat een cyclische ontwikkeling zien van een enkelvoudig zeegat naar een meervoudig zeegat en terug, met een periode van ca. 20, tot maximaal 54 (maar waarschijnlijk 41 jaar). De zeegaten migreren allen naar het oosten ten gevolge van: 1) de sterke oostwaartse sedimentaanvoer langs de kust; 2) uitbochttingseffecten van de geulen; en 3) plaatmigratie. Aangezien de meer oostwaarts gelegen geulen tijdens een meervoudige zeegatsituatie langzamer migreren dan de meer westwaarts gelegen geulen, halen deze de eerstgenoemde in en ontstaat er een oostwaarts gelegen enkelvoudig zeegat. De oostpunt van het eiland strekt zich dan zo ver mogelijk oostwaarts uit in de vorm van een strandvlakte.

Bij doorgaande oostwaartse migratie neemt de lengte van de transportweg van het water naar de Wadden toe. Op een bepaald moment worden over de strandvlakte nieuwe geulen gevormd en is opnieuw sprake van een meervoudig geulensysteem.



Figuur 4.5: Schematisch overzicht van de cyclische ontwikkeling van het Pinkegat: van een enkel zeegat (a) naar een meervoudig zeegat (b en c) en weer terug (a). Afzettingspatronen in de ondergrond aangegeven in wit (Oost, 1995).

4.1.3 Holocene sedimenten zoals afgeleid uit de historische ontwikkeling

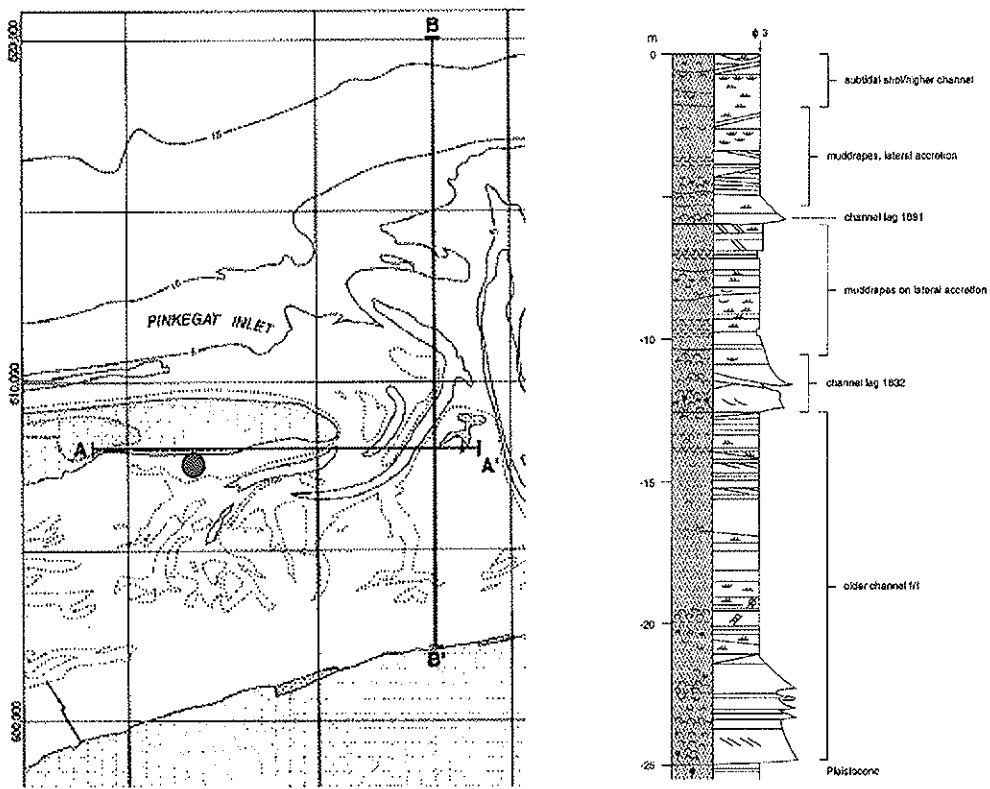
Aangezien de landwaartse migratie van het eiland relatief gering moet zijn geweest, kan aangenomen worden dat fijnkorrelige sedimenten vooral aan de zuidkant van Nieuwlandsreid (zie Fig. 1.1) afgezet zijn. Uitgaande van de beschikbare bronnen is het waarschijnlijk dat dit al vanaf in ieder geval de 15e eeuw gebeurde. Duidelijke bewijzen van kaarten voor de aanwezigheid van kreek- en kwelderafzettingen zijn pas beschikbaar vanaf circa 1665. Gezien de dan aanwezige kreken moet het kweldergebied dan al tenminste een eeuw hebben bestaan.

Op basis van historische bronnen van de ouderdom van het gebied en aannames met betrekking tot de relatieve zeespiegelstijging leiden wij af dat er in de kwelder van Nieuwlandsreid maximaal 4 m klei kan zijn afgezet, ervan uitgaande dat het gebied enkele eeuwen gedaald is, waarbij meerdere kweldersequenties bovenop elkaar zijn afgezet. Daarbij

kunnen ook lokaal dunne eolische afzettingen aanwezig zijn. Deze schatting komt overeen met kleidikte afgeleid uit sedimentatiesnelheden zoals gemeten door Dijkema (2005). Op grond van terreinkennis uit andere washover-complexen en washovers blijkt echter dat een gemiddeld kleipercantage van 10% normaler is voor dit soort afzettingmilieus omdat eolische afzettingen overheersen. Dit zou betekenen dat er sprake is van een gemiddelde kleidikte van 1 m welke zich met name ondiep bevinden met lokale uitschieters tot 4 m welke verdeeld over de Holocene sequentie kunnen voorkomen.

Naar analogie met waarnemingen van de washover-complexen op Spiekeroog en Schiermonnikoog kan verwacht worden dat noordwaarts van Nieuwlandsreid kleine duincomplexen en strandvlakte-afzettingen aanwezig waren. De ondergrond zal hier vooral uit zand bestaan.

Oostwaarts van Nieuwlandsreid overheersen vooral duinafzettingen van Het Oerd. Oostelijk daarvan is in de afgelopen eeuwen een kwelder aanwezig geweest op de zuidzijde. Op de noordzijde zijn wederom duinen ontwikkeld. Tot daar waar de geulen kwamen van het Pinkegat mag verwacht worden dat zandige afzettingen overheersen in de ondergrond. Op grond van de ligging van het Pinkegat sinds 1600 moet dat tenminste zijn geweest tot RD X coördinaat 190000. Oostwaarts ervan moet dus rekening gehouden worden met 1 of meerdere overwegend zandige geulafzettingen in de ondergrond, deze dateren van na 1750. Dit blijkt ook uit boring 91.032 (Fig. 4.6; Sha, 1992).



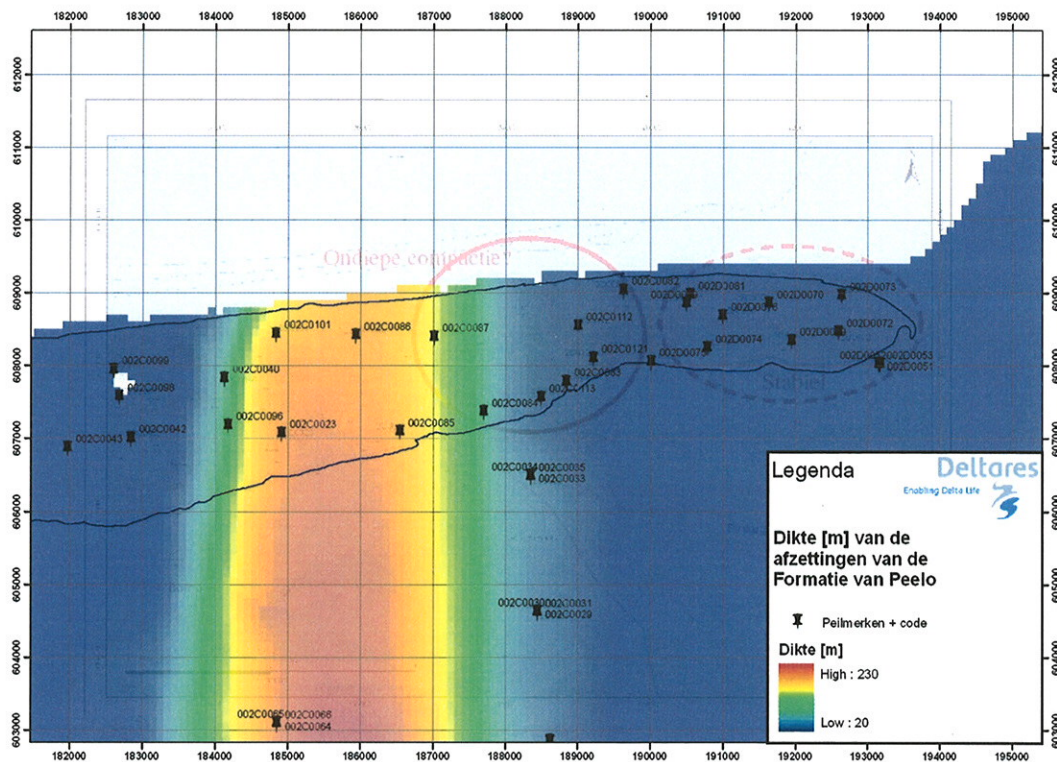
Figuur 4.6: Links, locatie (in rood)- en rechts, sedimentair log van kern 91.032 (naar Sha, 1992). Tot 25 meter diepte zijn diverse Holocene opvullingen van oostwaarts migrerende geulen te zien. Tot een diepte van 25 meter bestaat het sediment overwegend uit zand: karakteristiek voor het gebied oostelijk van RD X coördinaat 190000, en voor de diepere Holocene lagen ten westen van RD X coördinaat 190000.

4.2 Pleistocene opbouw van Ameland-Oost

De lithologische opbouw van de pleistocene afzettingen is bepaald aan de hand van DGM (landelijk lagenmodel) en beschikbare boringen. Speciale aandacht is hierbij uitgegaan naar de dikte en verbreiding van kleiniveaus binnen de Eem Formatie, de Formatie van Urk en de Formatie van Peelo (zogenoemde potkleien) die allemaal laterale variatie in zettingsgedrag kunnen introduceren. Afzettingen stratigrafisch dieper gelegen dan de Formatie van Peelo leveren geen differentiële compactie op en worden daarom buiten beschouwing gelaten.

De afzettingen van de Formatie van Peelo komen voor in diep in de ondergrond ingesneden geulen. Deze kunnen dieptes bereiken van enkele honderden meters. Buiten deze geulen kan de dikte van de formatie teruglopen tot 20 à 30 m. De formatie bestaat voornamelijk uit een opeenvolging van zanden met lokaal aan de top een niveau van stevige kleien, dat wordt onderscheiden als het Laagpakket van Nieuwolda. Deze klei staat wel bekend als de zogenaamde "potklei". Onder Ameland bevindt zich een Peelo-geul met een diepte van ongeveer 200 meter (Fig. 4.7; Bijlage 3). De top van de formatie bevindt zich op een diepte van 25 m -NAP aan de flanken van de geul tot 45 m -NAP in het centrale deel van de geul.

De diep in de ondergrond insnijdende Peelo-geulen worden geïnterpreteerd als door smeltwater gevormde sub-glaciale dalen tijdens de Elster glaciatie. Deze dalen zijn direct na het ontstaan ervan opgevuld met fluvioglaciale zanden. In de depressies die na deze invulling nog aanwezig waren ontstonden uitgestrekte glaciale meren waarin de (pot)kleien van het Laagpakket van Nieuwolda werden afgezet.



Figuur 4.7: Peilmerken en dikte grid van de afzettingen van de Formatie van Peelo. Het grid is afkomstig uit DGM.

Het is onduidelijk of RD X coördinaat 188000 de oostelijke begrenzing van de subglaciale tunnel vormt, zoals gesuggereerd wordt in Fig. 4.7. Seismische gegevens liggen ca. 3-4 km offshore en laten ter plekke een bredere tunnel zien waarvan de oostflank bij RD X coördinaat 192000 ligt (Kluiving et al., 2003). Op het eiland bereiken boringen de basis van de Formatie van Peelo niet ter plekke van de oostelijke flank van het dal. Op basis van herinterpretatie van bestaande seismiek is het aannemelijk dat de oostelijke begrenzing van de Peelo-geul rond RD X coördinaat 186400 zal liggen (pers. comm. A. Bosch).

Op basis van profielen en boring B02C0203, welke in de westelijke flank van de Peelo-geul staat, leiden wij een maximale dikte van de compacteerbare eenheden af. Deze eenheden bestaan uit Peelo potklei met een dikte ca. 26 meter, 21 m dikke kleien van de Formatie van Urk en 3 m dikke mariene klei uit de Eem Formatie. De dikte van deze mariene Eem kleien is, bij gebrek aan informatie ter plaatse, afkomstig uit boring B02D0037, deze boring ligt oostelijk van RD X coördinaat 190000. Het voorkomen van de Eem kleien is echter zo lokaal, dat we deze boring toch gebruiken, omdat we een mogelijke schatting willen geven van de dikte van deze kleien.

4.3 Samenvatting

4.3.1 Schatting van de dikte van de Holocene compacteerbare eenheden op basis van boorgegevens

Op basis van de beschikbare boringen en profielen (Bijlage 2) kan gesteld worden dat, in het gebied ten oosten van RD X coördinaat 190000, de Holocene ondergrond van Ameland-Oost overwegend bestaat uit zand met hier en daar een kleilaag en een enkele schelpenlaag. Ten westen van RD X coördinaat 190000 zien we dat het aandeel klei in het noordelijke profiel nihil is, dat het aandeel klei in het middenprofiel 6% bedraagt, en dat het aandeel klei in het zuidelijke profiel 25% is. Voor het zuidelijke profiel komt dit overeen met een maximale kleidikte van 1.5 à 2 m klei.

In het zuidelijke gebied wordt klei op grond van kennis over het afzettingmilieu, een kweldermilieu, voornamelijk bovenin verwacht (Van der Spek, 1996) zoals ook te zien is op de profielen van Bijlage 2. Onderin de Holocene sequentie zullen met name geul- en wadplaatafzettingen aanwezig zijn. Echter lokaal zouden kleien ook dieper voor kunnen komen als restgeulafzettingen of als bewaard gebleven oudere kweldersequenties. De kans wordt klein geacht, omdat de verwachting is dat door migratie van geulen deze afzettingen veelal herwerkt zullen zijn.

4.3.2 Schatting van de dikte van de Holocene compacteerbare eenheden op basis van historische gegevens

Op grond van terreinkennis uit washover-complexen, op grond van historische bronnen over de ouderdom van Nieuwlandsreid en op grond van aannames met betrekking tot de relatieve zeespiegelstijging leiden wij af dat er in de kwelder van Nieuwlandsreid maximaal 4 m klei kan zijn afgezet, ervan uitgaande dat het gebied gedurende langere tijd gedaald is. Echter bij een gemiddeld kleipercantage van 10% wat normaler is voor het soort afzettingmilieus waar we naar kijken (eolische afzettingen overheersen), is een gemiddelde kleidikte van 1 m, welke met name ondiep zal voorkomen, aannemelijk. Lokaal kunnen uitschieters tot 4 m voorkomen, verdeeld over de Holocene sequentie. Verwacht wordt dat 2 m van dit totaal, conform de uitkomsten uit paragraaf 4.3.1, zich in de bovenste 5 m bevindt, en dat de resterende 2 m dieper ligt. Met deze verdeling wordt rekening gehouden in Hoofdstuk 5 bij het schatten van de mogelijke maaiveldddaling.

4.3.3 Schatting van de dikte van de Pleistocene compacteerbare eenheden

Op basis van de matig diepe boringen B02C0203 en B02D0037 kunnen de volgende diktes van de compacteerbare eenheden gegeven worden:

- Mariene Eem kleien met een dikte van 3 m die lokaal kunnen voorkomen
- Urk kleien, voornamelijk afgezet in het centrale deel van de Peelo geul die daar een dikte van 21 m kunnen bereiken
- Potkleien van de Formatie van Peelo, tot 26 m dik

Doordat er maar een beperkt aantal matig diepe boringen in het gebied aanwezig is, is de lokale variatie in bovengenoemde diktes onvoldoende bekend.

5 Zettingskarakteristieken

5.1 Inleiding

Op grond van de gereconstrueerde lithologieën, boringen en historische bronnen, kan een schatting gemaakt worden van de maximale zetting en klink van de verschillende Kwartaire sedimenten teweeg kan brengen.

5.2 Holocene afzettingen

De Holocene afzettingen oostelijk van RD X coördinaat 190000 bestaan overwegend uit zand. De daling door klink of zuiging van de palen zal derhalve nihil zijn. Anders is dit mogelijk voor de Holocene afzettingen westelijk van RD X coördinaat 190000. De maximaal aanwezige kleipakket-dikte zou zo'n 4 meter kunnen bedragen, maar meer waarschijnlijk 1 meter en dan nog met name aan de zuidzijde van het eiland; aan de noordzijde is vrijwel geen klei aanwezig. Deze afzettingen worden ruwweg geschat op een ouderdom van maximaal 2000 jaar, maar in ieder geval tenminste 500 jaar tot enkele meters diepte. Als er 4 m klei wordt aangetroffen over de gehele Holocene sequentie, dan is het waarschijnlijk dat deze 4 m niet aaneengesloten is, maar uiteenvalt in verschillende pakketten die kunnen corresponderen met verschillende kwelderniveaus of een restgeulafzetting.

Op basis van klinkgegevens over 4 tot 5 meter dikke kleilagen direct onder maaiveld in de rijpingsgebieden van Zuidelijk Flevoland (Van Dooremolen et al., 1996) wordt een daling van minder dan 3 mm/jaar na 100 jaar rijping realistisch geacht. De IJsselmeerpolders zijn actief ontwaterd, waardoor de bodemdaling groter is dan in de kweldergebieden van de Waddenzee, waar het grondwaterpeil niet verlaagd is. Het gemiddeld grondwaterpeil is blijkens de putgegevens in DINO niet significant veranderd in de periode 1973-2006.

Naarmate de lagen dieper liggen en daardoor ouder zijn neemt het aandeel in de zetting logaritmisch af. Beneden 5 m onder maaiveld bedraagt de volume (= hoogte) afname minder dan 10% van de zetting van een laag aan de oppervlakte.

Gegeven de dikte van de kleilaag en de ouderdom zou dit een daling van minder dan 1 mm/jaar kunnen genereren voor een kleidikte van 1 meter en minder dan 0.5 tot 1.5 mm/jaar voor een kleidikte van in totaal 4 meter. Deze range is groot genomen, omdat onvoldoende bekend is, waar de kleilagen zich bevinden in de vertikaal. Er is hierbij rekening gehouden met een sterke afname van zetting naarmate de lagen dieper onder het oppervlak komen te liggen.

Aangezien de palen standaard 3,8 m diep onder het maaiveld steken, mag ervan worden uitgegaan dat de bijdrage van de ondiepe Holocene kleien (in de bovenste 5 m) voornamelijk zal bestaan uit zuigwerking. De zetting van de peilmerken valt dan in de praktijk lager uit door tegenwerking van de puntweerstand van de paal. De puntweerstand is afhankelijk van de grondsoort waar de paalpunt op rust en is minder voor een paalpunt in klei dan een paalpunt in zand.

Het effect van het gewicht van de overstuiving door het duin over de kwelderafzettingen ten oosten van RD X coördinaat 190000 is waarschijnlijk grotendeels uitgewerkt. De consolidatieperiode van de onder de duinen van Oerderduinen aangenomen kleilagen bedraagt niet meer dan enkele decennia.

5.3 Pleistocene afzettingen

De Pleistocene afzettingen westelijk van RD X coördinaat 188000 bestaan uit afzettingen gevormd in of boven een Peelo-geul. Ervan uitgaande dat de oostelijke flank van deze Peelo-geul zich inderdaad hier bevindt. Stratigrafisch dieper liggende eenheden worden buiten beschouwing gelaten omdat zij geen differentiële compactie opleveren.

In de Peelo-geul zijn 3 soorten klei aanwezig met elk verschillende maximale diktes (voor zover aangeboord):

- 1) 3 m klei van de Eem Formatie;
- 2) 21 m klei van de Formatie van Urk;
- 3) 26 m (pot)klei van de Formatie van Peelo.

Kooi (2008) heeft aangetoond dat de Holocene sedimentatie in het westen van Nederland een bijdrage aan de zakking van het maaiveld kan leveren van 0.1 tot meer dan 1 mm per jaar. Hierin levert ook de compactie van Tertiaire kleilagen nog een aandeel. De variatie in het voorkomen van deze mariene kleilagen mag op de schaal van het beschouwde gebied als gering worden beschouwd. Wanneer aangenomen wordt dat de Pleistocene kleilagen niet door de Saalien ijsskap zijn voorbelast, wat volgens Boulton&Dobbie (1993) het geval is als de ijsskap direct op een kleilaag rust, worden deze kleilagen later nog door de Holocene sedimentatie belast. Door de hydrodynamische vertraging werkt deze belasting bij kleilagen met een lage permeabiliteit tot op heden door.

De samendrukkingseigenschappen en permeabiliteiten zijn ter plaatse niet bekend. Een betere schatting dan de hierboven gegeven range voor het aandeel van de Pleistocene kleilagen is daarom niet te geven.

5.4 Totaal aan maximaal mogelijke daling

Het voorgaande geeft niet meer dan een orde van grootte van het aandeel van de samendrukbare lagen. Als de Holocene en overige daling wordt opgeteld is een autonome daling van 0.6-2.5 mm/jaar als gevolg van de sedimentologische processen mogelijk, daarbij meegenomen dat de kleilagen niet alleen binnen de eerste 5 m onder maaiveld liggen, maar ook dieper kunnen voorkomen. Deze range is mede zo groot omdat onvoldoende bekend is waar de kleilagen zich in het Holoceen bevinden en er dus rekening gehouden moet worden met diverse scenario's van voorkomen. De gegeven daling is een maaiveld daling. Hoe de peilmerken reageren op deze maaiveld daling is onduidelijk, omdat onbekend is waarop de peilmerken gefundeerd zijn.

6 Conclusies

Gebruikte data

- Harde informatie over de grondsoorten beneden 5 meter onder maaiveld ontbreekt grotendeels. Dit gebrek aan data wordt deels opgevuld door gebruik te maken van historische bronnen en DGM.
- In hoofdstuk 5 is aangetoond dat laterale verschillen in het voorkomen van pleistocene kleilagen een deel van de verschillen in gemeten daling kunnen verklaren. De beperkte informatie over permeabiliteit, sedimentatiesnelheid, voorkomen en dikte van deze kleilagen verhindert om de variatie in zakking meer betrouwbaar en nauwkeurig te kwantificeren. Resultierend in een grote range van de gegeven zakking.

Lithologische opbouw

- De Holocene sedimenten bestaan oostelijk van RD X coördinaat 190000 vooral uit zand, dit blijkt zowel uit boorgegevens als uit historische bronnen.
- Uit ondiepe boringen blijkt dat westelijk van RD X coördinaat 190000 aan de noordzijde van Ameland in de bovenste 5 meter onder maaiveld vooral zand aanwezig is, terwijl aan de zuidkant maximaal 1.5 à 2 m klei aanwezig is, die overwegend vrij jong (enkele eeuwen) zal zijn.
- Op grond van historische bronnen kan gesteld worden dat er minimaal 1 m en maximaal 4 m klei in de Holocene sequentie zit.
- De Pleistocene compacteerbare eenheden zijn kleien behorende bij de Eem Formatie, de Formatie van Urk en de Formatie van Peelo. De ligging van de oostelijke flank van de Peelo-geul is onduidelijk. Als de oostelijke flank van de Peelo-geul ligt bij RD X coördinaat 188000 dan bevindt zich een dikker pakket compacteerbare Pleistocene afzettingen oostelijk van RD X coördinaat 188000 dan westelijk.

Te verwachten bodemdaling

De bodemdaling voor het Holoceen is berekend gebruikmakend van een range aan mogelijke kleidiktes afkomstig van zowel boorgegevens als historische bronnen, namelijk van minimaal 1 m tot maximaal 4 m. Deze 1 m zal met name ondiep voorkomen (binnen de bovenste 5 m), en de 4 m is gesplitst in een ondiep voorkomen van 2 m en een diep voorkomen (dieper dan 5 m beneden maaiveld) van 2 m. In Tabel 6.1 is een overzicht te zien van de op grond van de lithologie te verwachten bodemdaling in mm per jaar.

Tabel 6.1 Overzicht van de op basis van de lithologische opbouw te verwachten bodemdaling in mm/jaar.

	Westelijk van RD coördinaat	RD X coördinaat	Oostelijk van RD X coördinaat
Holoceen	0.5 - 1.5	190000	<0.1
Pleistoceen	<0.1 (zonder Peelo-geul) - 1 (met Peelo-geul)	188000	<0.1
Totaal	<0.6 – 2.5		<0.1

Totaal kan de maximale bodemdaling tussen <0.6 en 2.5 mm/jr bedragen. Dit zijn de twee extremen, van 1m ondiepe Holocene klei en geen Peelo geul, tot 4 m Holocene klei (verdeeld over de sequentie) en de aanwezigheid van de Peelo-geul. Met name de onzekerheid over de totale dikte en de diepteligging van de Holocene kleien bepaalt deze range. De berekende bodemdaling is een maaiveld daling. Hoe de peilmerken reageren op deze maaiveld daling is onduidelijk, omdat niet bekend is waarop de peilmerken gefundeerd zijn.

De zetting van de peilmerken zal in de praktijk lager uitvallen dan de gegeven maaiveldaling.

Vervolgonderzoek met name gericht op het inwinnen van aanvullende ondergrondgegevens zou duidelijk maken wat de totale hoeveelheid klei met name in de Holocene afzettingen is en op welke diepte deze kleien zich bevinden.

7 Referenties

Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 18 jaar gaswinning. Assen.

Boulton, G.S., Dobbie, K.E., 1993. Consolidation of sediments by glaciers: relations between sediment geotechnics, soft-bed glacier dynamics and subglacial ground-water flow. *Journal of Glaciology* 39, 26–44

Dijkema, K.S., van Duin, W.E., van Dobben, H.F., 2005. Kweldervegetatie op Ameland: effecten van veranderingen in de maaiveldhoogte van Nieuwlandsrijd en De Hon. In: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 18 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland.

Van Dooremolen, van der Schreer en Winkels (1996), "Waarnemingen en prognoses van de maaiveldaling in Flevoland", Flevovericht nr. 388, Dir. –Gen. Rijkswaterstaat

Eysink, W.D., N. Dankers, K.S. Dijkema, H.F. van Dobben, C.J. Smit, J. de Vlas, 1995: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Eerste evaluatie na acht jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, Assen. 62 pp.

Eysink, W.D., K.S. Dijkema, H.F. van Dobben, P.A. Slim, C.J. Smit, J. de Vlas, M.E. Sanders, J. Wiertz & E.P.A.G. Schouwenberg 2000. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 13 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, Assen. 217 pp. + 7 bijl.

Kluiving, S.J., J.H.A. Bosch, J.H.J. Ebbing, C. Mesdag, & R. Westerhoff, 2003: Onshore and Offshore Seismic and Lithostratigraphic Analysis of a Deeply Incised Quaternary Buried Valley-System in the Northern Netherlands. *Journal of Applied Geophysics*, 53, 249-271.

Kooi (2008). Compactiebijdragen aan bodemdaling langs de kust. In: Bodemdaling langs de Nederlandse kust. Eds. Barends et al. Delft University Press.

Marquenie, J.M. & D. Doornhof, 2005: Bodemdaling en gaswinning. In: Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 18 jaar gaswinning. Assen, 9 pp.

NAM 1, Eysink et al., 2005 & Bodemdaling door Aardgaswinning, NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, Status rapport 2005 en Prognose tot het jaar 2050, december 2005. NAM rapport EP200512202238.

NAM 2, Aanvraag instemming winningsplan Ameland Oost en Ameland Westgat.

NAM 3, MER Aardgaswinning Waddenzeegebied vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, januari 2006.

NAM 4, Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen – resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2006 en 2007, respectievelijk september 2007 rapportnummer EP 200612205324 en 29 april 2008 rapportnummer EP200803216458.

De Jong, M. & T. van den Heiligenberg (Red.), 2005: Het Tij Gekeerd; Natuurherstel in het waddengebied, een gezamenlijk initiatief van acht Nederlandse natuurbeschermingsorganisaties, Bedum, 62 pp.

Löffler, M.A.M., C.C. de Leeuw, M.E. ten Haaf, S.K. Verbeek, A.P. Oost, A.P. Grootjans, E.J. Lammerts & R.M.K. Haring, 2008: Eilanden natuurlijk : natuurlijke ontwikkeling en veerkracht op de Waddeneilanden.

Oost, A.P., 1995: Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. Thesis. A study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. Univ. of Utrecht, Netherlands, 1995. 1 ed. 520 p.

Oost, A.P. & E.J. Lammerts, 2007 (Eds.): Het Tij Geleerd, achtergrondrapport: Programma voor de uitwerking van herstelmaatregelen in het Waddengebied steunend op een onafhankelijke wetenschappelijke voorbereiding en begeleiding.

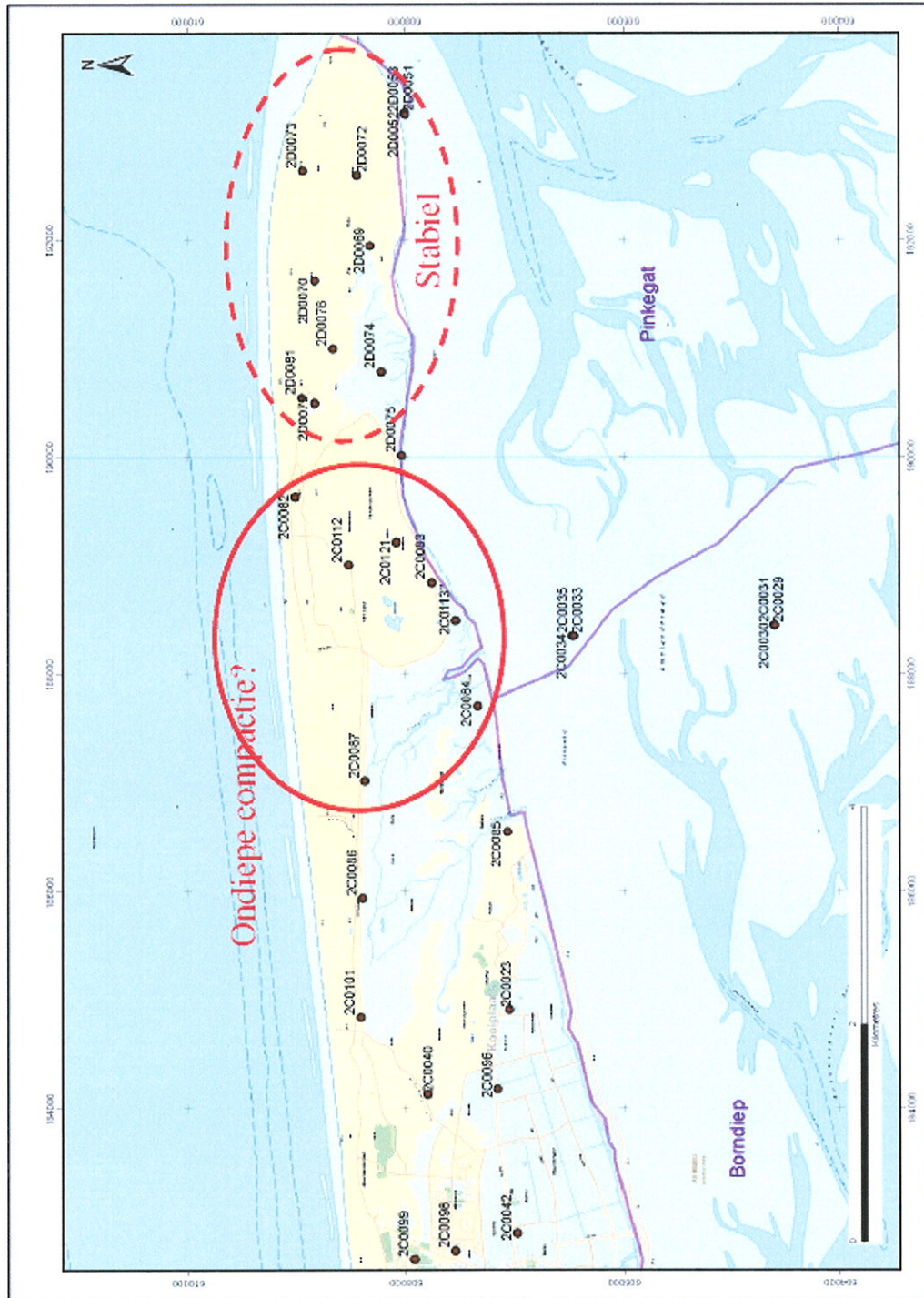
Oost, A.P., E.J. Lammerts & A. Woudstra, 2007 (Eds.): Het Tij Geleerd; Natuurherstel en onderzoek in het waddengebied, 25 pp.

Sha, L.P., 1992: Geological Research in the Ebb-Tidal Delta of ' Het Friesche Zeegat', Wadden Sea, The Netherlands, Rapport R.G.D.-Projekt 40010, 20 pp.

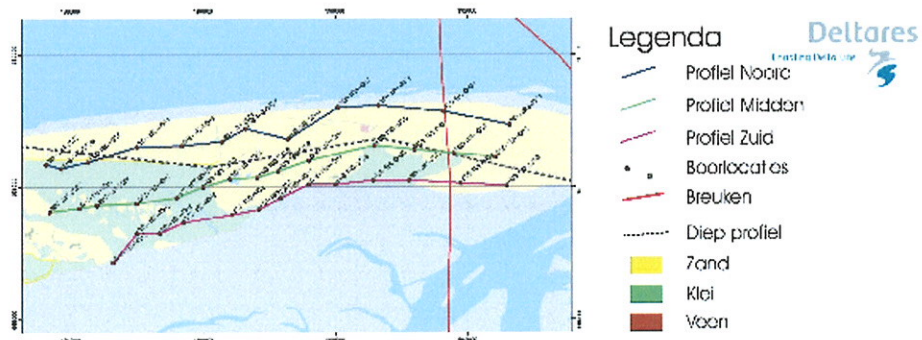
Sipma, P., 1927: Oudfriese Oordkonden, eerste deel, Nr 326, p. 227-228.

Van der Spek, A.J.F. , 1996. Holocene depositional sequences in the Dutch Wadden Sea of the island of Ameland. Meded. Rijks Geol.Dienst, 57, p.41-68.

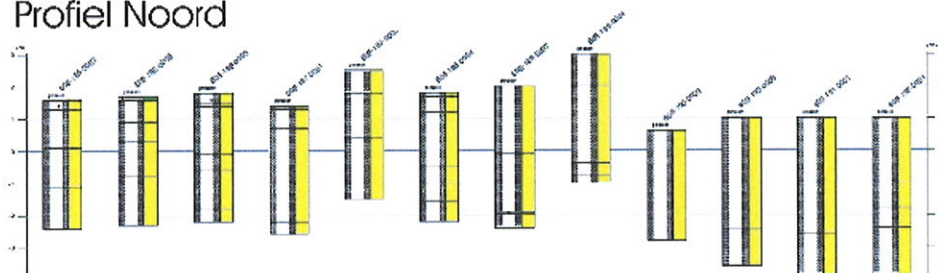
A Locatiekaart aangeleverd door NAM



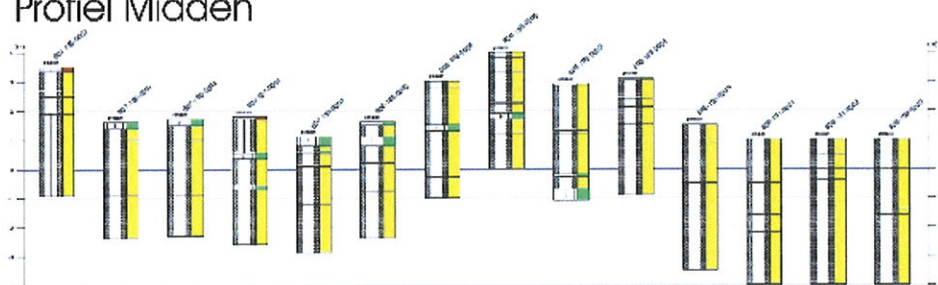
B Ondiep profiel



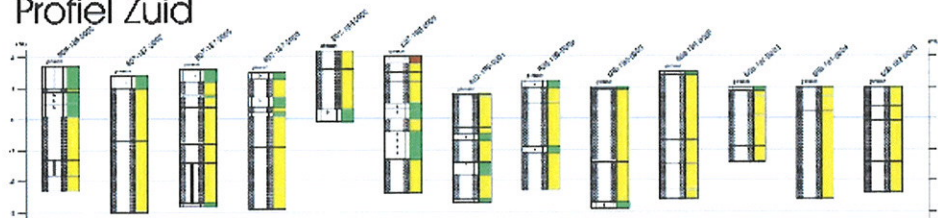
Profiel Noord



Profiel Midden



Profiel Zuid



C Matig diep profiel door DGM

