

Morfologische veranderingen als gevolg van bodemdaling door gaswinning

Locatie Zuidwal TotalFinaElf

22 april 2004

Morfologische veranderingen als gevolg van bodemdaling door gaswinning

Locatie Zuidwal TotalFinaElf

22 april 2004

Rapport RIKZ/2004.004

Auteur: ir. M.C. Rommel, RIKZ

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	5
2 Gaswinning en bodemdaling	7
2.1 Gaswinning	7
2.2 Waddenzee	7
2.3 Bodemdaling & Waddenzee	7
3 Aanpak bepaling bodemdaling en morfologie	9
3.1 Peilmerken	9
3.2 Modelvoorspellingen	9
3.3 Lodingen	9
4 Metingen bodemdaling	11
5 Modelvoorspellingen bodemdaling	13
6 Morfologische verandering	15
7 Vergelijking van de morfologische ontwikkeling met de bodemdaling	21
8 Discussie	23
9 Conclusies	25
Inhoudsopgave Bijlagen	26

Samenvatting

Sinds 1988 wordt op de locatie Zuidwal in de Waddenzee door TotalFinaElf gas gewonnen. Gaswinning kan vanwege de daarbij optredende bodemdaling gevolgen hebben voor de morfologie, zoals (al dan niet tijdelijke) afname van plaatareaal en -hoogte, hetgeen invloed kan hebben op de ecologie in de vorm van afnemende foerageergebieden en -tijden. Aan de hand van gegevens van metingen en modellen wordt in dit onderzoek getracht te bepalen in welke mate de gaswinning in het TotalFinaElf-veld bodemdaling veroorzaakt en hoe daardoor de morfologie in het omringende Waddengebied beïnvloed wordt, m.a.w.: wordt de veroorzaakte bodemdaling gecompenseerd door (een versterkte) sedimentatie in het gebied? Gezien de onnauwkeurigheden in de meetgegevens is het antwoord in dit rapport indicatief van karakter.

De totale hoeveelheid netto sedimentatie in het studiegebied ($11,25 \times 15,5 \text{ km}^2$) in de periode van 1988 tot 1997 bedraagt $14,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ tot $16,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (afhankelijk van gebruikte methode). Door de onnauwkeurigheid in de metingen is deze sedimentatie maximaal $59,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ en minimaal $-26,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. De opgetreden bodemdaling bedraagt in dezelfde periode volgens de peilingen van de diepe ondergrond $3,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Op basis van de huidige meettechnieken kan worden geconcludeerd dat er een kans is van 73-82% dat er voldoende sedimentatie binnen het beschouwde gebied heeft plaatsgevonden om de bodemdaling in de periode 1988-1997 volledig te compenseren. De kans dat in ieder geval een deel is gecompenseerd is 78 tot 88%. In de morfodynamiek zijn de effecten van bodemdaling niet te onderscheiden van de bestaande dynamiek. Dit is ook niet realistisch gezien de circa vijf maal zo grote sedimentverplaatsingen die van nature in de Waddenzee plaatsvinden t.o.v. de verlaging door bodemdaling.

Voorspellingen geven aan dat de uiteindelijke bodemdaling rond 2010/2015 maximaal 11 cm zal zijn en daarbij een kom zal veroorzaken van $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ in het studiegebied.

Volgens de bestaande inzichten wordt de zandhonger gestild door zand afkomstig uit andere delen van het systeem zoals eilandkusten, geulen en wadplaten. Iedere m^3 bodemdaling resulteert uiteindelijk in een m^3 kustachteruitgang en draagt daarmee bij tot achteruitgang van de kustlijnen van Vlieland, Terschelling en, in mindere mate Texel en Noord-Holland.

1 Inleiding

Sinds 1988 wordt op de locatie Zuidwal in de Waddenzee door TotalFinaElf gas gewonnen. Gaswinning kan vanwege de daarbij optredende bodemdaling nadelige gevolgen hebben voor de morfologie en daarmee voor de ecologie.

Doel van deze studie is een beeld te verkrijgen van effecten van door gaswinning veroorzaakte daling van de diepe ondergrond op het zeegatsysteem van het Vlie. Het rapport heeft een indicatief karakter.

Aan de hand van metingen en modellen wordt in dit onderzoek bepaald in welke mate de gaswinning in het TotalFinaElf-veld blijvende daling van de zeebodem veroorzaakt en hoe daardoor de morfologie in het Waddengebied beïnvloed wordt, m.a.w.: wordt de veroorzaakte bodemdaling gecompenseerd door (een versterkte) sedimentatie in het gebied?

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van ir. A. Prakken (Directie Noord Nederland, Rijkswaterstaat). Een review is verricht door dr. A.P. Oost en ir. H.P.J. Mulder (RIKZ, Rijkswaterstaat). In bijlage 1 worden de productielocatie en het concessiegebied getoond, die in 1984 zijn bepaald.

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 worden de gevolgen van gaswinning in het algemeen en toegespitst op de Waddenzee besproken. Hoofdstuk 3 beschrijft de aanpak van het onderzoek. In hoofdstuk 4, 5 en 6 worden de resultaten besproken van respectievelijk de peilmerken, de voorspellingen en de lodingen. In hoofdstuk 7 worden morfologie en bodemdaling gecombineerd. Hoofdstuk 8 bevat een discussie en hoofdstuk 9 sluit af met de conclusies.

2 Gaswinning en bodemdaling

2.1 Gaswinning

Bij de winning van gas wordt geen gesteentemateriaal weggehaald zoals bij de winning van vaste delfstoffen. De gesteentelagen waarin gas voorkomt blijven intact, ze worden slechts door de druk van de bovenliggende gesteentelagen in elkaar gedrukt. De eventueel optredende bodemdaling is in orde grootte van centimeters, maar strekt zich doorgaans uit over een gebied van enkele kilometers. Het dalingsgebied is schotelvormig en de daling verloopt geleidelijk. De hoeveelheid daling hangt af van de gasdruk, de samendrukbaarheid en porositeit van het gesteente en de dikte van de gesteentelaag. Verder is de daling afhankelijk van de locatie, diepte van het veld, de vorm van de kom en de dikte en samenstelling van bovenliggende sedimentlagen.

2.2 Waddenzee

Het waddensysteem bestaat uit een aantal aparte zeegatsystemen welke van elkaar worden gescheiden door hoogliggende platen. Voor de onderdelen (getijdenplaten, geulen, buitendelta's, eilanden, kwelders) van de zeegatsystemen blijken empirische wetmatigheden te gelden, die duiden op een dynamisch evenwicht tussen de morfologie van de onderdelen en de hydraulische condities zoals getij en golfklimaat. Ingrepen in dit systeem zijn niet nieuw. Afsluitingen zoals die van het IJsselmeer en het Lauwersmeer hebben het karakter van het waddensysteem niet wezenlijk aangetast. Dit is te danken aan het feit dat grote zandtransporten van vele 10^6 m^3 het mogelijk maakten om waar nodig nieuwe evenwichtssituaties te bereiken of oude te herstellen.

2.3 Bodemdaling & Waddenzee

In het geval van bodemdaling door gaswinning zal het bergingsvolume in de Waddenzee toenemen. Naar de effecten van een dergelijke relatieve zeespiegelstijging zijn vrij veel studies^{1,2} gedaan. De conclusies van deze studies worden in grote lijnen hieronder weergegeven: in eerste instantie neemt door deze relatieve verlaging van de intergetijdeplaten het getijvolume toe. De geulen in het gebied dalen ook en kunnen al dan niet door extra aanpassing de toename in getijdenvolume verwerken. In eerste instantie kan door de dynamiek binnen een kombergingsgebied een deel van de bodemdaling in het dalingsgebied worden gestild door aanvoer van zand uit omliggende platen en geulen, waardoor daar weer het evenwicht verstoord raakt.

De ecologie kan ook als gevolg van de bodemdaling worden beïnvloed: een lagere ligging van de platen leidt in het algemeen tot een afname in biomassa. Indien het plaat- of kwelderareaal verandert, heeft dat onder andere invloed op de foerageerfunctie en een functie als hoogwater

¹ Louters, T. & F. Gerritsen, 1994. Het mysterie van de Wadden. Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rapport RIKZ-94.020

² Oost et al., 1998. Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee. NAM. ISBN 90-804791-4-4

vluchtplaats van het gebied en zal de ecologie zich aan de nieuwe situatie aanpassen.

Na verloop van tijd herstelt zich echter het evenwicht. De boven de platen optredende verdieping leidt tot een minder sterke invloed van golven op de bodem en tegelijkertijd voor een grotere aanvoer van in het water zwevend sediment, waardoor zand gemakkelijker tot bezinking kan komen en het getijdenvolume weer afneemt tot het oude evenwicht. Daardoor moeten ook de getijdengeulen weer zoveel aanzanden dat ze weer op het oude evenwicht komen.

Bij een doorgaande verdieping zoals bij zeespiegelstijging plaatsvindt, zullen de getijdenplaten qua opvulling altijd iets achter lopen op het gewenste evenwichtsniveau. Naarmate de zeespiegelstijgingsnelheid hoger is zal het plaatniveau dieper komen te liggen t.o.v. het evenwichtsniveau.

Voor al deze aanzanding is sediment nodig. Deze sedimentbehoefte staat bekend als de zandhonger. De sedimentatie herstelt op termijn dus het oude dynamische evenwicht in de vloedkom. Dat punt wordt bereikt wanneer de verdieping weer is opgevuld, en daarmee de stroomsnelheden en de zandtransportcapaciteit weer op het oude peil zijn gebracht. Voor instantane compensatie dient de daling niet te snel te gaan. Bij snelle daling zal het systeem iets achter gaan lopen en zal volledige compensatie plaatsvinden in een tijdsbestek van een paar decennia tot een eeuw. In de tussenliggende periode bestaat, zoals al aangegeven, wel de mogelijkheid dat sediment binnen het kombergingsgebied wordt verplaatst, waardoor de bodemdalingschotel a.h.w. wordt 'uitgesmeerd' over een groter gebied.

Potentiële bronnen om de zandhonger van de vloedkom te stillen, zijn de buitendelta en de eilandkusten. Aangezien het zandvolume van de buitendelta ook afhankelijk is van het getijdenvolume zal uiteindelijk al het zand moeten worden geleverd via kustwaartse terugtrekking van de eilandkusten.

3 Aanpak bepaling bodemdaling en morfologie

De gaswinning vindt plaats op de rand van de Lange Zandplaat en de Oude Inschot, ten zuidwesten van Griend met als centrale coördinaat (140,400; 577,800) (bijlage 2). De winning bevindt zich op een diepte tussen de 1829 en 1925 m en bestaat uit negen putten.

In dit onderzoek wordt de bodemdaling als gevolg van de gaswinning gekwantificeerd op basis van peilmerken en modelvoorspellingen. Vervolgens worden de morfologische veranderingen als gevolg van de bodemdaling in beeld gebracht.

De gebruikte data voor dit onderzoek bestaan uit peilmerkdata van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat, voorspellingen van TotalFinaElf en lodingsdata van de Meetdienst van Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland.

3.1 Peilmerken

Peilmerkdata worden gebruikt om de bodemhoogte van het studiegebied vóór en tijdens de gaswinning in beeld te brengen. Op die manier kan eventuele bodemdaling in het studiegebied als gevolg van de gaswinning worden waargenomen. Uit het rapport Hydrostatische waterpassing in het westelijke waddengebied van de Meetkundige Dienst³ zijn de vereffende data verzameld. De metingen betreffen de periode van 1988 tot aan 2000. De gemeten data zijn vrij vereffend om geschikt te maken voor kaartjes en analyse. Bij vrije vereffening worden de meetpunten t.o.v. een vast punt, in dit geval Griend, bepaald. Er is een discontinuïteit in de metingen waardoor de bodemdaling op verscheidene punten in de tijd onderbroken is. Alleen van de jaren 1994-2000 kon met behulp van interpolatie een verschilkaartje worden gemaakt. De onnauwkeurigheid (standaardafwijking σ) bij peilmerkmetingen is ongeveer 2 mm per meting.

3.2 Modelvoorspellingen

Voorspellingen van TotalFinaElf aan de hand van modellen en peilmerkdata worden gebruikt om de uiteindelijke daling als gevolg van de gaswinning te bepalen. Indien de voorspellingen van dezelfde orde grootte zijn als de gemeten daling vergroot dat bovendien de zekerheid van de voorspelde verwachtingen. Bij de voorspellingen –zowel wat betreft de modellen als de peilmerkdata- wordt uitgegaan van een winperiode die loopt van 1988 tot aan 2010/2015.

3.3 Lodingen

Lodingsdata worden gebruikt om de morfologische veranderingen tijdens en vóór de gaswinning in beeld te brengen. De lodingsdata van 1948 tot 1997 zijn verwerkt tot verschilkaarten waarop de hoeveelheden sedimentatie en erosie (in perioden van 4 tot 23 jaar) zijn aangegeven.

³ Rapport Hydrostatische waterpassing in het westelijke waddengebied 1999-2000; Rapportnummer: NAP2001-61, 16-05-2001, Meetkundige Dienst, P. van Vuuren

Door ook de lodingen in de perioden vóór de gaswinning te analyseren wordt de bestaande dynamiek van de morfologie in beeld gebracht. Wanneer de peilmerkkarten en lodingkaarten met elkaar vergeleken worden, kan de eventuele invloed van de bodemdaling op de morfologie worden geanalyseerd.

Uitgangspunt is daarbij dat indien de netto sedimentatie in een bepaalde periode 0 is, dit betekent dat de oppervlakte ten gevolge van de gaswinning in de diepere lagen weliswaar is meegezakt, maar dat in deze periode volledige compensatie door sedimentatie is opgetreden waardoor het oude niveau weer bereikt is. Een statistische meetfout (op te vatten als standaardafwijking van een normale verdeling) in de gemiddelde diepte van het gebied van $\sigma = 5 - 7,5$ cm is aangenomen voor alle metingen. Deze fout is moeilijk vast te stellen⁴ zodat hiervoor twee waarden gehanteerd worden.

Zandwinning, schelpenwinning of vaargeulonderhoud kunnen ook van invloed zijn op de sedimenthuishouding. Bij de zandwinning van $0,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ in 1988 in de Blauwe Slenk waarmee destijds de zandhaak om Griend is aangelegd heeft de gunstige ligging in de geul gezorgd voor natuurlijk herstel. Daarnaast hebben er verder zoals blijkt uit de Jaarboeken, Wadatlas en baggercijfers in de betreffende periode rondom het studiegebied geen processen als zandwinning en schelpenwinning plaatsgevonden. Daarom worden de genoemde processen in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten.

⁴ zie o.a. Oost, A.P. en H. de Haas, 1992. Het Friesche Zeegat, morphologische-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht. Deel 1 en 2, rapport Kustgenese

4 Metingen bodemdaling

In bijlage 2 worden de meetlocaties van de peilingen en de winlocatie getoond. Zoals in de figuur te zien is, liggen de punten redelijk verspreid om de winput. Echter, ten gevolge van de uitval van verscheidene punten is een beperkt aantal bruikbare data overgebleven. Bovendien beslaan de peilmerkmetingen een relatief korte periode, namelijk alleen de periode van winning.

In bijlage 2 wordt tevens de interpolatie getoond van de peilmerkdataverschillen 1994-2000. De figuur toont een ovale kom met een maximale daling van 26,1 mm op de plaats van de gaswinning. De bodemdaling neemt af naarmate de afstand tot aan de winlocatie groter wordt. De schijnbare stijging van de bodem op de eilanden en het vaste land kan verklaard worden door de toegepaste vereffeningsmethode. Een vast punt op Griend wordt hierbij als referentie beschouwd met een zakkingwaarde van 0. Doordat Griend bij het zakkinggebied ligt lijkt het gebied verder van de gaswinning af te zijn gestegen. Het beïnvloede gebied heeft een straal van ongeveer 5,5 km.

In bijlage 3 wordt de gemiddelde bodemdaling per periode en per locatie in tabelvorm getoond. De maximale bodemdaling in het centrum van de kom betreft volgens de peilingen 69,5 mm in 1997 t.o.v. 1988 zoals in bijlage 3 wordt getoond.

5 Modelvoorspellingen bodemdaling

In 1993 is er een voorspelling gedaan voor de integrale bodemdalingstudie⁵ over de bodemdaling in het gebied. De maximaal verwachte bodemdaling na beëindiging van de winning bedroeg 20 cm in het centrum van de bodemdalingcirkel met een straal van zo'n 10 km.

Een meer recente modelvoorspelling door TotalFinaElf van september 2002 geeft een maximale daling van 10 cm in het centrum van de kom. Dit model geeft een voorspelling van de totale cumulatieve bodemdaling na beëindiging van de gaswinning rond 2010/2015 met een naijelperiode van 30 jaar. In bijlage 4 is een visualisatie van het model gegeven en in bijlage 5 is het model in het gebied getekend. Het modelgebied is cirkelvormig met een straal van zo'n 5,5 km. In bijlage 6 worden de interpolatiedata en het model gecombineerd. Hierop is te zien dat de vorm van de bodemdaling niet geheel overeenkomt met de interpolatie van de peilmerkdata. Dit is het gevolg van de beperkte hoeveelheid aan data waarmee de interpolatie heeft plaatsgevonden en daarnaast van de schematisatie waarmee het model de werkelijkheid weergeeft.

Als de reservoirdruk -door gaswinning- afneemt zal de resulterende druk die door de erboven liggende gesteentepakketten wordt uitgeoefend op het reservoir toenemen, waardoor het reservoirgesteente wordt samengedrukt. In vergelijking met andere reservoirs heeft locatie Zuidwal een lage druk⁶, en zou dit de oorzaak kunnen zijn van de kleinere daling dan verwacht. Ook is de ondergrondse geologie sterk afwijkend t.o.v. Ameland en Slochteren.

Staatstoezicht op de Mijnen⁷ heeft ook onderzoek gedaan naar Zuidwal en geven een overzicht van de gasproductiecijfers. De totale *gasproductie* uit Zuidwal tot begin 2003 bedroeg $13,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. De totale hoeveelheid verwachte *gasproductie* bedraagt $15,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ bij een einde van de gasproductie rond 2010/2015. Gezien de gemeten bodemdaling in het diepste punt over de periode 1988 tot 2000 van 88,5 mm (bijlage 3) bij een *gasproductie* van $13,0 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ kan bij een lineair verloop van de bodemdaling een einddaling van $(15,6/13,0) \cdot 88,5 = 106,2 \text{ mm}$ worden verwacht. Uit de goede overeenkomst tussen deze resultaten en de voorspellingen van TotalFinaElf mag blijken dat de berekening van de maximale bodemdaling in het centrum (bijlage 3) betrouwbaar mag worden geacht.

Indien de nieuwe geplande boring in 2004 succesvol verloopt, verwacht TotalFinaElf een additionele bodemdaling van 4 mm in het diepste punt van de schotel als gevolg van extra gasproductie. Het gevolg hiervan zal een uiteindelijke daling van 11 cm zijn in het diepste punt.

De doorsnede van de bodemdalingsschotel -die wordt bepaald a.d.h.v. de effectieve doorsnede van de ondergrondse reservoirlaag van waaruit het

⁵ Invloed van gaswinning op de Waddenzee, juli 1993, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren

⁶ Rapport Stuurgroep "Mijnbouwactiviteiten in de Waddenzee" okt 1993 Ministerie van EZ

⁷ Dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, Staatstoezicht op de Mijnen, okt 2003

gas wordt gewonnen als gevolg waarvan het gesteente gaat compacteren-
bedraagt 7 km. De laag ligt op een diepte van maximaal 2 km. De
beïnvloedingshoek naar maaiveld toe is 45 graden zodat de diameter van
de bodemdalingschotel aan maaiveld ($7+2+2=$) 11 km bedraagt. De straal
R is dan 5,5 km. De inhoud (V) van de bodemdalingschotel na beëindiging
van de gaswinning rond 2010/2015 kan voorspeld worden met een
omwentelingsparaboloïde met straal R en diepte h: $V = 0,5\pi R^2 h =$
 $1,57 * (5500)^2 * 0,11 = 5,2 * 10^6 \text{ m}^3$. Het volume (V) bodemdaling is dan voor
de periode 1988-1997 ($V=0,5\pi R^2 h=1,57 * (5500)^2 * 0,070=$) $3,30 * 10^6 \text{ m}^3$.

NB: uit bovenstaande gegevens valt op te maken dat de voorspellingen in
de loop der tijd door verbeterde voorspelling naar beneden toe zijn
bijgesteld; van 20 naar 10 cm. De eindprognose van de bodemdaling komt
binnen 10% overeen met de voorspelling van 11 cm op basis van
metingen. Voor verdere berekeningen is er dan ook van uitgegaan dat de
maximale bodemdaling door gaswinning vanaf het begin van het boren
t/m het eind van de zakking zo'n 11 cm zal zijn.

6 Morfologische verandering

Ten eerste dient opgemerkt te worden dat de maximale onnauwkeurigheid (σ) van lodingen (5 tot 7,5 cm) van dezelfde orde grootte is als de totale maximale gemeten en voorspelde bodemdaling.

De processen van sedimentatie en erosie kunnen echter wel worden versterkt of verzwakt door de opgetreden bodemdaling. Daarom worden de lodingkaarten van vóór en tijdens de winning met elkaar vergeleken. Bijlagen 7 t/m 12 geven de sedimentatie en erosie voor de verschillende perioden van 1948 tot aan 1997. De oppervlakte van het studiegebied (bijlage 7) is ongeveer hetzelfde als het gebied bij de peilmerkdata en het voorspellingsmodel (bijlage 6) om een goede vergelijking te kunnen maken tussen morfologische verandering en bodemdaling. De lodingen betreffen een rechthoekige vorm van ongeveer 15,5*11,25 km², het dalingsgebied overdekkende, met de winput als centraal punt. De keuze van een iets groter studiegebied dan de bodemdalingschotel is gebaseerd op de gedachte dat het voor het opvullen van de schotel benodigde zand uit de onmiddellijke omgeving zou kunnen worden onttrokken. Daarbij is de rechthoekvorm gekozen omdat de geulen een sterk Noord-Zuid sedimenttransport mogelijk maken. Voor iedere periode wordt een sedimentatie-/erosiekaart getoond.

De netto hoeveelheid toe- of afname van sediment in het studiegebied is berekend. In tabel 1 worden de hoeveelheden per periode en per jaar getoond. Bij de lodingen is in kolom 3 de gemeten bodemdaling opgeteld omdat ook dit volume moet zijn gesedimenteerd. De volumeberekening van de bodemdaling in kolom 3 wordt in bijlage 3 getoond. De schijnbare netto erosie in de laatste periode wordt hierdoor zelfs omgezet in netto sedimentatie. In kolom 4 worden de hoeveelheden sedimentatie per jaar gegeven.

Tabel 1

Netto sedimentatie / erosie in het studiegebied per periode in 10^6 m^3

Periode	Gemeten net sed [$*10^6 \text{ m}^3$]	Bodemdaling [$*10^6 \text{ m}^3$]	Net sed incl. bodemdaling [$*10^6 \text{ m}^3$]	Net sed incl. bodemdaling per jaar [$*10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$]
1948-1971	34,0		34,0	1,48
1971-1975	8,1		8,1	2,02
1975-1981	-4,2		-4,2	-0,69
1981-1985	14,1		14,1	3,53
1985-1991	23,0	1,0	24,0	4,00
1991-1997	-0,4	2,3	1,9	0,32

6.1 Methoden

Er worden in dit hoofdstuk twee verschillende methoden uiteengezet om de netto sedimentatie tussen 1988 en 1997 in beeld te brengen. De eerste methode betreft een berekening a.d.h.v. de metingen 1985, 1991 en 1997 waarbij de bepaling van de waarde in 1988 wordt bepaald door lineaire interpolatie tussen 1985 en 1991. Hiervoor is gekozen vanwege de mogelijk opgetreden verandering in sedimentatiepatroon a.g.v. de gaswinning vanaf 1988. Het nadeel van deze methode is dat men geen rekening houdt met de lange termijn trend. Daarom is nog een methode toegepast.

De tweede methode betreft een regressielijn die is getrokken m.b.v. de jaren 1971 t/m 1997. Voor het weglaten van de meting in 1948 is gekozen vanwege de grote invloed van deze opname op de regressielijn. De regressielijn is lineair omdat de gegevens geen andere trend suggereren en daarnaast de grote foutenmarges een andere regressielijn niet nodig maken.

Bij beide methoden wordt onderscheid gemaakt tussen de lodingfout $\sigma=5$ cm en $\sigma=7,5$ cm.

Methode Lineaire interpolatie

Op het verschilkaartje 1948-1971 is er met name veel morfologische verandering in het zuidelijk deel van het studiegebied waar te nemen. Zoals ook in de Leidraad Zandige Kust is beschreven, vond er een vergroting van het in- en uitstromend debiet plaats a.g.v. de afsluiting van de Zuiderzee. De afsluiting in 1932 d.m.v. de Afsluitdijk zorgde voor een verandering van getijhoogten en stromingspatronen en die zorgden op hun beurt weer voor morfologische veranderingen zoals het verkleinen, vergroten en verplaatsen van geulen⁸.

In figuur 1 wordt de cumulatieve sedimentatie getoond. Gemiddeld verloopt de sedimentatie (uitgezonderd in de periode 1975-1981) tamelijk gelijkmatig (rechte lijn). Over de jaren heen heeft een netto sedimentatie plaatsgevonden. Zoals in tabel 1 en in figuur 1 te zien is, is er een grote variatie in sedimentatiehoeveelheden per periode aanwezig. In de periode 1975-1981 was er waarschijnlijk sprake van netto erosie en in de periode 1981-1985 lijkt er netto een grote sedimentatie te zijn opgetreden terwijl er nog geen gas werd gewonnen. Dit geeft aan dat het systeem van nature erg dynamisch kan zijn. Vanaf 1991 lijkt de sedimentatie weer te zijn

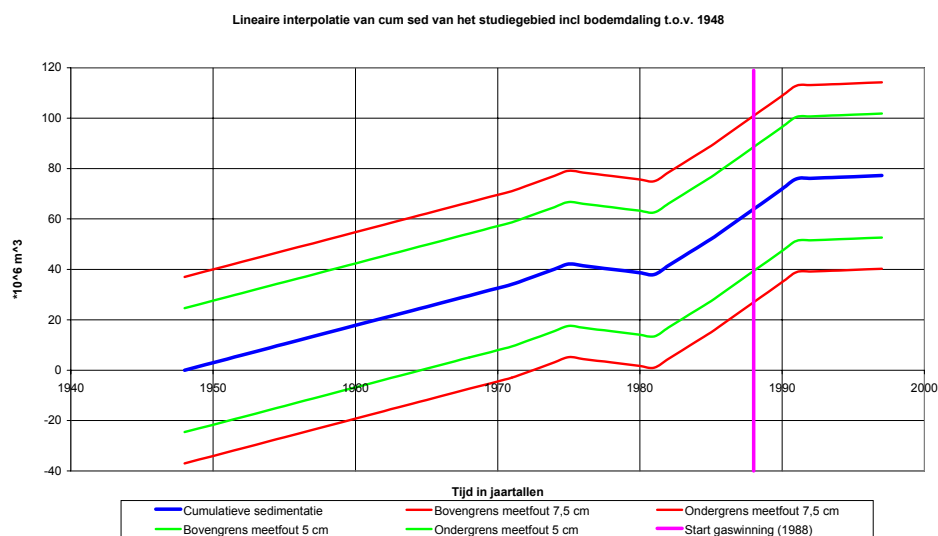
⁸ Rapport Autonome ontwikkeling Westelijke Waddenzee, Een doorkijk naar de toekomst, 2003, RIKZ: A.P. Oost en P.A.H. Kleine Punte

afgenomen. De periode van winning (vanaf 1988) toont een periode met veel sedimentatie en vervolgens een periode met minder sedimentatie.

Het exacte verloop van de bodemdaling, noch van de sedimentatie per jaar, kan a.g.v. de grote meerjaarlijkse tijdstappen tussen de metingen niet worden bepaald. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat gelijk vanaf het begin van de daling al sedimentatie heeft plaatsgevonden. De erosie in de periode van 1975-1981 is de uitzondering en kan niets te maken hebben met de gaswinning van deze studie⁹.

Figuur 1

Cumulative sedimentatie in het studiegebied+foutenmarges



Verder dient er rekening te worden gehouden met een foutenmarge in de voluminaberekeningen. Uitgaande van een meetfout (σ) is de fout in het verschil tussen twee opnamen gelijk aan $\sigma\sqrt{2}$. Voor een fout van 7,5 cm betekent dit voor het betreffende gebied een standaard deviatie (σ) van $(7,5\sqrt{2}\text{cm} * 15,5 \text{ km} * 11,25 \text{ km} \Rightarrow) 18,5 * 10^6 \text{ m}^3$ in het verschil tussen twee cumulatieve volumes. De meetfout tussen twee opnamen is dan $(2\sigma) 37 * 10^6 \text{ m}^3$. Zoals in tabel 1 te zien is betekent dit dat de foutenmarge in alle gevallen groter is dan de netto sedimentatie. Indien wordt uitgegaan van een meetfout (σ) van 5 cm betekent dit voor het betreffende gebied een standaard deviatie (σ) van $12,3 * 10^6 \text{ m}^3$. De meetfout tussen twee opnamen is dan $(2\sigma) 24,6 * 10^6 \text{ m}^3$.

Volgens de lineaire interpolatie is de cumulatieve netto sedimentatie in 1988 gelijk aan $63,5 * 10^6 \text{ m}^3$ t.o.v. 1948. De cumulatieve netto sedimentatie in 1997 is gelijk aan $77,9 * 10^6 \text{ m}^3$ t.o.v. 1948. De netto sedimentatie tussen 1988 en 1997 bedroeg dus $14,4 * 10^6 \text{ m}^3$.

⁹ Het zou ook nog een meetfout kunnen betreffen in de loding van 1981

Methode Regressielijn

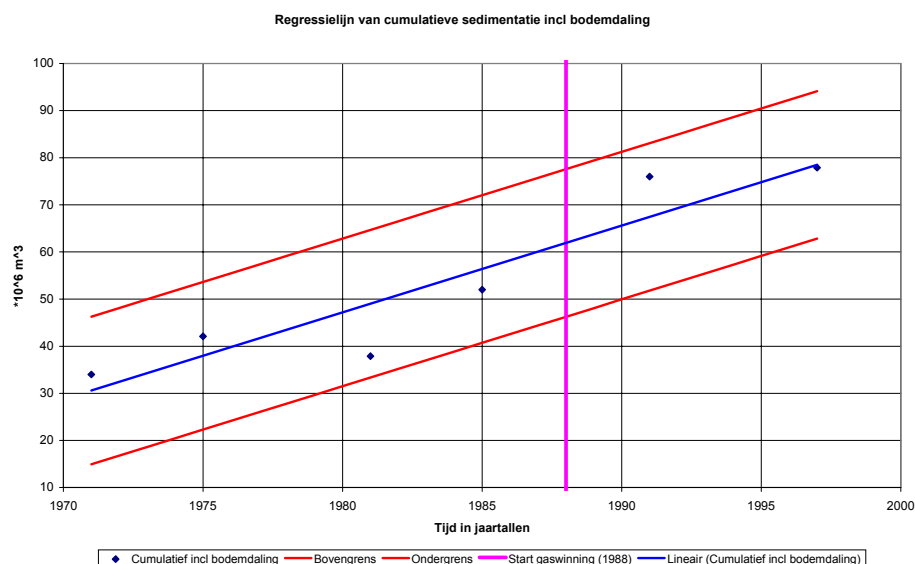
In figuur 2 wordt de tweede methode getoond. Het betreft een lineaire regressielijn die is getrokken m.b.v. de jaren 1971 t/m 1997, waarbij het jaar 1948 niet is meegenomen, vanwege de relatief grote afstand tot de andere punten. Uitgaande van een meetfout (σ) van 7,5 cm betekent dit voor het betreffende gebied een standaard deviatie (σ) van $\sqrt{(18,5^2 + (7,83\sqrt{2})^2)} = 21,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, waarbij 18,5 = standaarddeviatie voor het verschil tussen twee volumes (zie hierboven) en 7,83 = standaardfout a.g.v. lineaire regressie voor één punt (zie tabel 2). De maximale meetfout tussen twee opnamen is dan $(2\sigma) 43,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Indien wordt uitgegaan van een meetfout (σ) van 5 cm betekent dit voor het betreffende gebied een standaard deviatie (σ) van $\sqrt{(12,3^2 + (7,83\sqrt{2})^2)} = 16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De meetfout tussen twee opnamen is dan $(2\sigma) 33,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Volgens deze methode is de sedimentatie gedurende de periode 1988 tot 1997 $16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Figuur 2

Regressielijn door de cumulatieve sedimentatie in het studiegebied in 10^6 m^3



Tabel 2

Bepaling sedimentatie via regressielijn-methode in 10^6 m^3

Lineaire regressielijn ($y=a+bx$)	
A	-3599,16
B	1,841585
R²	0,867993
Standaard fout	$7,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Cumulatief tot 1988	$61,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Cumulatief tot 1997	$78,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
1997-1988	$16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Resumerend (zie ook tabel 3): gezien de onzekerheden in de metingen en het geringe aantal meetjaren dat beschikbaar is waarin bodemdaling is opgetreden t.o.v. de meetperioden waarbij er geen gas werd gewonnen is het niet met zekerheid te zeggen of de sedimentatiehoeveelheden daadwerkelijk zijn toe- en vervolgens afgenomen, hoewel de meetwaarden daar wel op lijken te wijzen. De sterke verplaatsingen van de geulen tonen de dynamiek van het systeem, die de opgetreden bodemdaling waarschijnlijk zal compenseren.

7 Vergelijking van de morfologische ontwikkeling met de bodemdaling

Op het eerste gezicht lijkt figuur 1 te suggereren dat er een afname van de netto sedimentatiesnelheid plaatsvindt. Maar deze valt geheel binnen de onzekerheidsmarges van de lodingen. We zullen hier wat nader naar kijken. Een vergelijking tussen de morfologische veranderingen en de bodemdaling in de periode van gaswinning (1988-1997) wordt in tabel 2 weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de twee methoden bij een standaarddeviatie van $\sigma = 5$ en 7,5 cm.

Tabel 3

Resumé van de sedimentatie en de minima en maxima over de periode 1988-1997 via de diverse methoden

Methode	Gemiddelde sedimentatie	Standaarddeviatie σ	Minimum (-2σ)	Maximum ($+2\sigma$)
Lineaire interpolatie	$14,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	5 cm	$-10,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$39 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
		7,5 cm	$-22,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$51,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Regressielijn	$16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	5 cm	$-16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$49,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
		7,5 cm	$-26,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$59,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Bodemdaling	$3,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$			

De opgetreden bodemdaling bedraagt in de periode 1988-1997 volgens de peilingen - uitgaande van 69,5 mm daling (zie bijlage 3) in het centrum - $3,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Methode Lineaire interpolatie

Volgens de Lineaire interpolatiemethode bedraagt de totale hoeveelheid netto sedimentatie in dezelfde periode ($3/6 \cdot 23,0 + 1,0 - 0,4 + 2,3 =$) $14,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ met voor $\sigma = 7,5$ cm een maximum van ($14,4 + 37 =$) $51,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en een minimum van ($14,4 - 37 =$) $-22,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Op dezelfde wijze kan voor $\sigma = 5$ cm een maximum van $39 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en een minimum van $10,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ worden berekend.

De kans dat de berekende bodemdaling volledig is gecompenseerd, dus dat de netto sedimentatie $3,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of meer bedraagt in de periode 1988-1997 volgens de Lineaire interpolatiemethode, kan statistisch worden bepaald en is 73 tot 82% (toepassing van normale verdeling met $(x-\mu)/\sigma = (3,30-14,4)/18,5$ tot $(3,30-14,4)/12,3$).

Methode Regressielijn

Volgens de Regressielijn-methode bedraagt de totale hoeveelheid netto sedimentatie in dezelfde periode $16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ met voor $\sigma = 7,5$ cm een maximum van ($16,6 + 43,2 =$) $59,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en een minimum van ($16,6 - 43,2 =$) $-26,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Op dezelfde wijze kan voor $\sigma = 5$ cm een maximum van $49,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en een minimum van $-16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ worden berekend.

De kans dat de berekende bodemdaling volledig is gecompenseerd in de periode 1988-1997 volgens de Regressielijn-methode, kan statistisch worden bepaald en is 73 tot 79% (normale verdeling met $(x-\mu)/\sigma = (3,30-16,6)/21,6$ tot $(3,30-16,6)/16,6$).

Het resultaat van beide methoden is ongeveer gelijk. De grotere sedimentatie volgens de regressielijn-methode gaat samen met een grotere standaardafwijking door de 'optelling' van de meetfout en de standaardfout van de regressielijn.

Naast de kans op volledige compensatie kan op vergelijkbare wijze de kans bepaald worden dat er geen netto sedimentatie is opgetreden, dus dat de bodemdaling tenminste al deels gecompenseerd is (conform de verwachtingen over herstel bodemdalingschotel als weergegeven in paragraaf 2.3). Deze kans bedraagt 78 tot 88% volgens de methode van lineaire interpolatie en 78 tot 84 % volgens de regressielijn-methode.

8 Discussie

Aan de hand van de resultaten uit de voorgaande hoofdstukken vindt in dit hoofdstuk de discussie plaats.

In de Zuidwal-praktijk is het onmogelijk om d.m.v. de bestaande metingen de precieze vorm en uitgestrektheid van de bodemdalingsschotel betrouwbaar vast te stellen¹⁰. Dit komt omdat er op de bodem van de Waddenzee weinig meetposities zijn, die bovendien slechts met veel moeite aangemeten kunnen worden. De berekening van het volume van de bodemdalingsschotel zelf gebeurt dan ook m.b.v. modelmatige overwegingen waarbij (worstcase) de bodemdaling gemaximaliseerd is (na controle via modelvoorspellingen en gaswinningcijfers).

Omdat de maximaal opgetreden bodemdaling in het centrum van de schotel (9 cm) kleiner is dan de nauwkeurigheid waarmee de lodingen ter bepaling van de morfologische veranderingen kunnen worden uitgevoerd (10-15 cm), is de invloed van de bodemdaling op de morfologie niet exact te bepalen. Wel kan worden vastgesteld dat de kans dat de bodemdaling in de periode 1988-1997 volledig is gecompenseerd door sedimentatie 73-82% is. M.a.w.: er is een kans van 4:5 dat binnen het gebied de bodemdaling in deze periode volledig is gecompenseerd door sedimentatie. De kans dat in ieder geval een deel is gecompenseerd is 78-88%. Of het daarvoor benodigde zand geheel aangevoerd is vanuit de Noordzee of dat het (deels) is aangevoerd vanuit andere delen van de Waddenzee is op grond van deze studie niet te zeggen. Daarvoor zou een groter gebied kunnen worden bekeken, maar gezien de meetfout in de lodingen zal dit geen definitieve conclusie mogelijk maken.

De zandhonger wordt gestild door zand afkomstig uit andere delen van het systeem zoals eilandkusten, geulen en wadplaten². Uiteindelijk wordt al dit sediment onttrokken uit de kusten van de eilanden en de kop van Noord-Holland. Een extra zandhonger door bodemdaling draagt daarmee uiteindelijk bij tot achteruitgang van de kustlijn.

Uit de bijlagen 7 t/m 12 komt duidelijk de buitengewone dynamiek van het gebied naar voren. Daarbij blijkt dat de verticale variaties in sedimentatie/erosie (dm/jaar, nog ongecorrigeerd voor bodemdaling) veelal een ordegrootte hoger zijn dan de verticale bodemdaling (cm/jaar). De verwachting kan dan ook uitgesproken worden dat de bodemdaling over een groter gebied wordt uitgesmeerd door een sterke onderlinge sedimentuitwisseling.

Het rapport heeft een indicatief karakter. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de grote onnauwkeurigheid van de lodingen, anderzijds is het aantal metingen van zowel de peilmerken als de lodingen beperkt. Hierdoor neemt de betrouwbaarheid van de resultaten af.

Enkele verbeteringen van de resultaten zouden kunnen worden gerealiseerd d.m.v. een analyse van de lokale maximale sedimentatie en erosie in het

¹⁰ Dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, Staatstoezicht op de Mijnen, okt 2003

studiegebied om een meer nauwkeurige indicatie van de natuurlijke dynamiek te verkrijgen. In plaats van de gekozen rechthoekige vorm zou dan de ovale bodemdalingvorm gebruikt kunnen worden zodat de netto sedimentatie beter kan worden vergeleken met de bodemdaling. Daarnaast zouden de lodingresultaten van 2003, zodra deze beschikbaar zijn, gebruikt kunnen worden om de juiste trendlijn te kunnen bepalen.

9 Conclusies

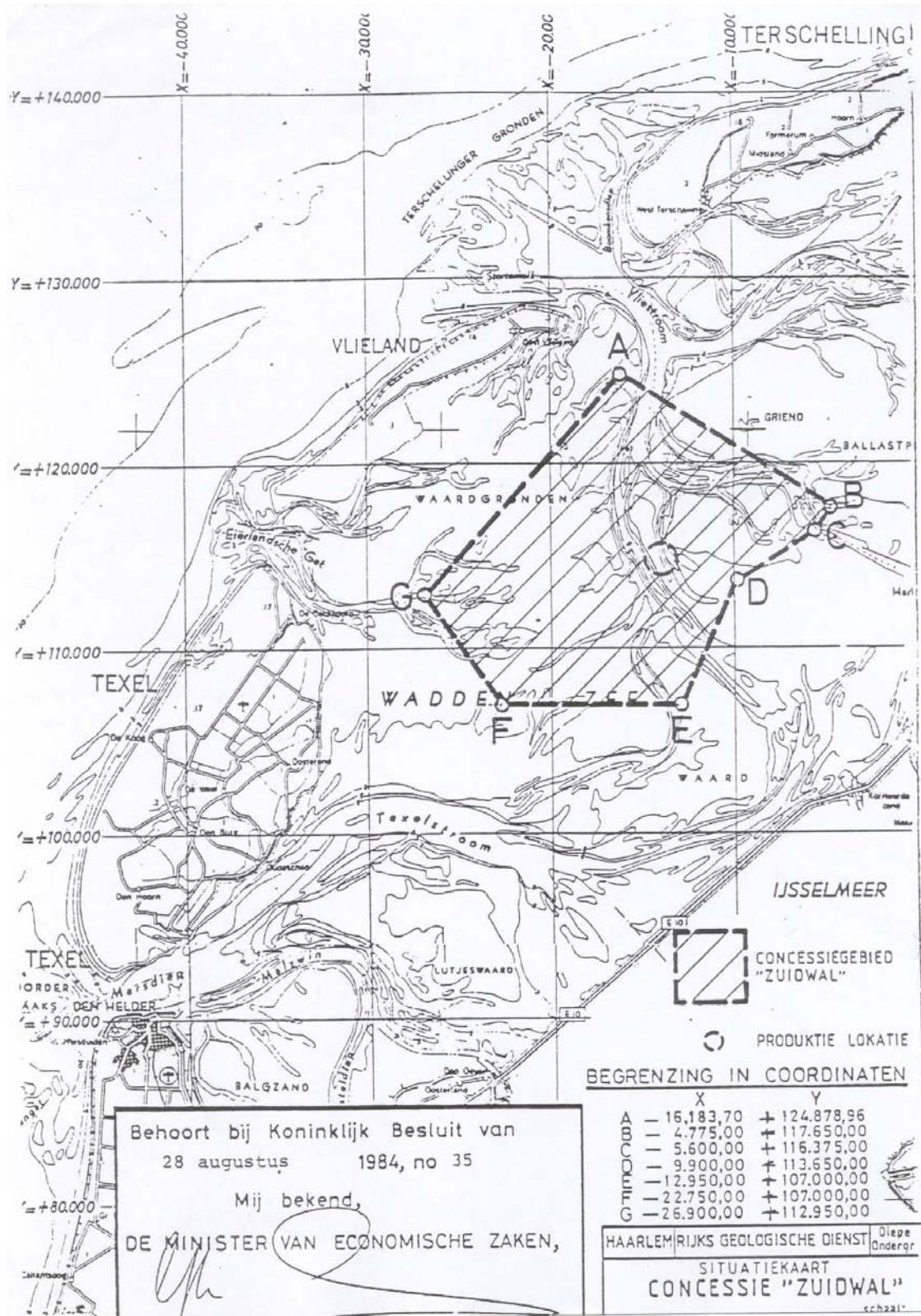
- De totale hoeveelheid netto sedimentatie in de periode van 1988 tot 1997 bedraagt, afhankelijk van de gebruikte methode, $14,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ tot $16,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ met een maximum van $59,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en een minimum van $-26,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
- De grote onzekerheid in de bepaling van de sedimentatie wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid van de lodingen.
- De opgetreden bodemdaling bedraagt in dezelfde periode (1988-1997) volgens de peilingen $3,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Deze is klein t.o.v. de gemiddelde sedimentatiehoeveelheden in het gebied ($16 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per decennium).
- In de morfodynamiek zijn de effecten van bodemdaling niet te onderscheiden van de bestaande dynamiek. Dit is ook niet realistisch gezien de sedimentverplaatsingen in het gebied die van nature al plaatsvinden en die gemiddeld vijf maal zo sterk zijn dan de verlaging door bodemdaling en de sterke bruto dynamiek.
- Geconcludeerd wordt dat gegeven de meetfout er een kans is van 73-82% dat het volume van de bodemdalingsschotel binnen het beschouwde gebied nu al geheel is opgevuld door sedimentatie.
- De kans dat binnen het beschouwde gebied de bodemdaling tenminste deels is gecompenseerd door sedimentatie is berekend op 78 tot 88%.
- Het is niet te zeggen welk gedeelte van het hiervoor benodigde sediment uit de Waddenzee is aangevoerd ("uitsmeren" van de bodemdaling) en welk gedeelte al afkomstig is uit de Noordzeekustzone.
- De resultaten van de lodingen suggereren in eerste instantie een toename en vervolgens een afname van de sedimentatiesnelheid, maar deze vallen geheel binnen de onzekerheidsmarges van de lodingen.
- Voorspellingen geven aan dat de uiteindelijke bodemdaling van de ondergrond rond 2010/2015 11 cm zal zijn en daarbij een kom zal veroorzaken van $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
- De verwachting voor de toekomst is dat de bodemdaling met een zekere naijling volledig zal worden gecompenseerd door sedimentatie. Dit geldt voor het studiegebied, deels bestaande uit vlakke ondiepe platen. Het hiervoor benodigde zand komt uiteindelijk uit de kusten van Vlieland, Terschelling en, in mindere mate Texel en Noord-Holland. Iedere m^3 bodemdaling resulteert daarmee uiteindelijk in een m^3 Noordzeekusterosie.

Inhoudsopgave Bijlagen

Bijlage 1	Concessiegebied "Zuidwal"
Bijlage 2	Meetlocaties van de peilingen en de winning, interpolatie van de peilmerkdataverschillen 1994-2000
Bijlage 3	Gemiddelde bodemdaling per periode en per locatie
Bijlage 4	Visualisatie van het voorspellingsmodel
Bijlage 5	Voorspellingsmodel gecombineerd met het gebied
Bijlage 6	Interpolatiedata (1994-2000) gecombineerd met voorspellingsmodel
Bijlage 7	Situatie interessegebied voor sedimentatie en erosie, netto sedimentatie van het studiegebied (1948-1971)
Bijlage 8	Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied (1971-1975)
Bijlage 9	Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied (1975-1981)
Bijlage 10	Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied (1981-1985)
Bijlage 11	Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied (1985-1991)
Bijlage 12	Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied (1991-1997)

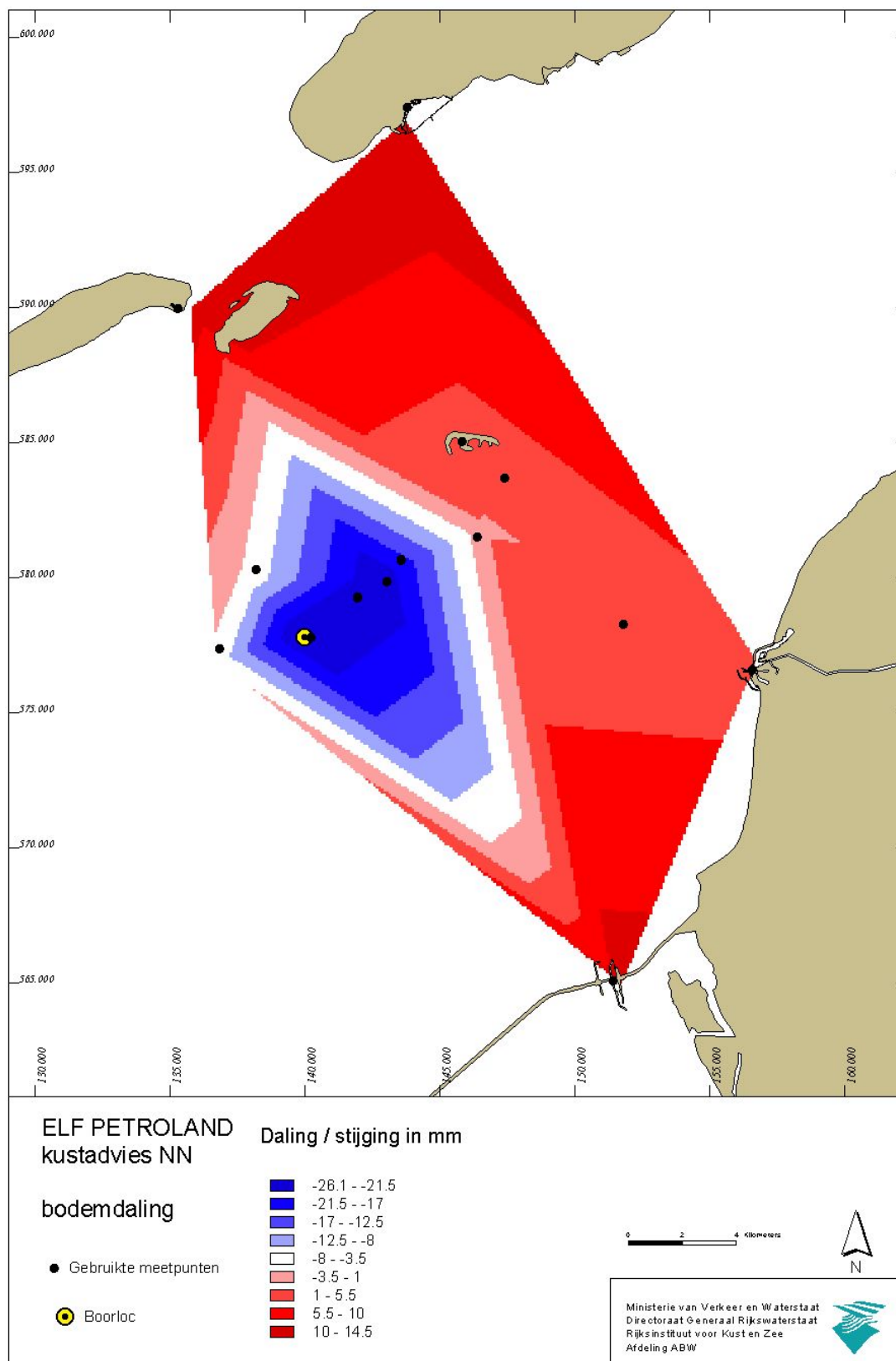
Bijlage 1

Concessiegebied "Zuidwal".



Bijlage 2

Meetlocaties van de peilingen en de winning,
interpolatie van de peilmerkdataverschillen
1994-2000.



Bijlage 3

Gemiddelde bodemdaling per periode en per locatie. Basisgegevens Meetkundige Dienst, Rijkswaterstaat

			(km)	Daling per periode (mm)			Gem.daling per jaar per periode (mm/jaar)		
Locatie	x	y	Afst tot winpunt	1988-1991	1991-1994	1994-2000	1988-1991	1991-1994	1994-2000
005C0022	134,040	590,010	0,17	-19*	-21	-26,2	-6,3	-7,0	-4,4
005C0027	139,490	589,350	2,13		-14,2	-21,8		-4,7	-3,6
005C0012	136,490	589,350	2,145		-14	-21,8		-4,7	-3,6
005C0010	132,760	589,210	2,151	-11,5	-14,1	-21,4	-3,8	-4,7	-3,6
004H0017	131,080	588,600	3,31		-13,7	-15,9		-4,6	-2,7
005C0028	139,490	589,350	3,33		-3,5	-25,6		-1,2	-4,3
005C0015	139,490	589,350	3,332			-26,9			-4,5
005C0014	136,490	589,350	3,338	-2,4		-30,5	-0,8		-5,1
005C0013	136,490	589,350	3,344			-27,4			-4,6
004H0021	135,340	590,010	3,557			-3,8			-0,6
004H0022	130,350	588,010	3,558			-4,1			-0,7
004H0023	131,810	588,650	3,561			-4,7			-0,8
005C0029	139,490	589,350	4,26		-8,5	-9,9		-2,8	-1,7
005C0018	133,460	590,980	4,277		-8,4	-11,5		-2,8	-1,9
005C0016	139,490	589,350	4,28	-1,8	-8,5	-11	-0,6	-2,8	-1,8
005C0031	135,450	590,870	7,04		-7,5	1,1		-2,5	0,2
000A2732	145,835	585,015	9,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
005C0037	138,820	579,350	9,16			-1,4			-0,2
005D0071	132,270	581,920	11,44			-0,9			-0,2
000A4054	135,320	589,940	13,16			12,4			2,1
000A4020	156,612	576,557	16,26		-8,4	3,5		-2,8	0,6
000A4051	151,436	565,067	16,85	1,7*	8,7	11,9		2,9	2,0
000A4038	143,830	597,393	19,89		-5,7	14,5		-1,9	2,4

* *schatting*

Voor het bepalen van het volume van de bodemdalingsschotel die zich ontwikkelde tussen 1988 en 1997 t.o.v. NAP zijn we afhankelijk van modelberekeningen en van de peilmerken. De totale daling van het centrum van het bodemdalinggebied kan berekend worden door bij elkaar op te tellen

1) De daling over de periode 1988-1997 ten opzichte van het referentiepunt.

Dat is $19 + 21 + 26,2/2 = 53,1$ mm

De waarde 19 mm is geëxtrapoleerd op basis data van andere stations.

2) de daling van het referentiepunt Griend ten opzichte van de vaste wal.

Dat is iets moeilijker aangezien er maar weinig punten beschikbaar zijn waarvoor een goede reeks beschikbaar is.

Punt 000A4054 (Vlieland) valt af doordat de reeks te kort is.

Punt 000A4020 (Harlingen) valt af doordat zoutwinning invloed kan hebben.

Punt 000A4038 (Terschelling) valt af doordat deze daalt wat niet te verwachten is.

Punt 000A4051 (Kornwerderzand) blijft over.

De extra daling is: $1,7 + 8,7 + 11,9/2 = 16,4$ mm.

Totaal voor maximale daling centrum ($53,1 + 16,4$) = 69,5 mm.

De waarde 1,7 mm is geëxtrapoleerd op basis van data van andere stations. Vooralsnog gaan we –ook gezien de vrij nauwkeurige voorspellingen zoals gedaan voor het Ameland veld- ervan uit dat de omtrek van de bodemdalingcirkel door de modelvoorspellingen (bijlage 4) goed wordt weergegeven.

Het volume (V) bodemdaling is dan voor de periode 1988-1997
($V=0,5\pi R^2 h=1,57*(5500)^2*0,070=$) $3,30*10^6 \text{ m}^3$

Voor de tussenliggende perioden geldt:

1988-1991: Bodemdaling in centrum (h) = $19+1,7=20,7 \text{ mm}$;

Volume = $1,0*10^6 \text{ m}^3$

1991-1997: Bodemdaling in centrum (h) = $21+26,2/2+8,7+11,9/2=48,8 \text{ mm}$;

Volume = $2,3*10^6 \text{ m}^3$

De totale daling in het centrum van de kom in de periode 1988 tot 2000 is:

1) De daling over de periode 1988-1997 ten opzichte van het referentiepunt:

$19 + 21 + 26,2 = 66,2 \text{ mm}$.

2) de daling van het referentiepunt Griend ten opzichte van de vastewal:

De extra daling is: $1,7+8,7+11,9 = 22,3 \text{ mm}$.

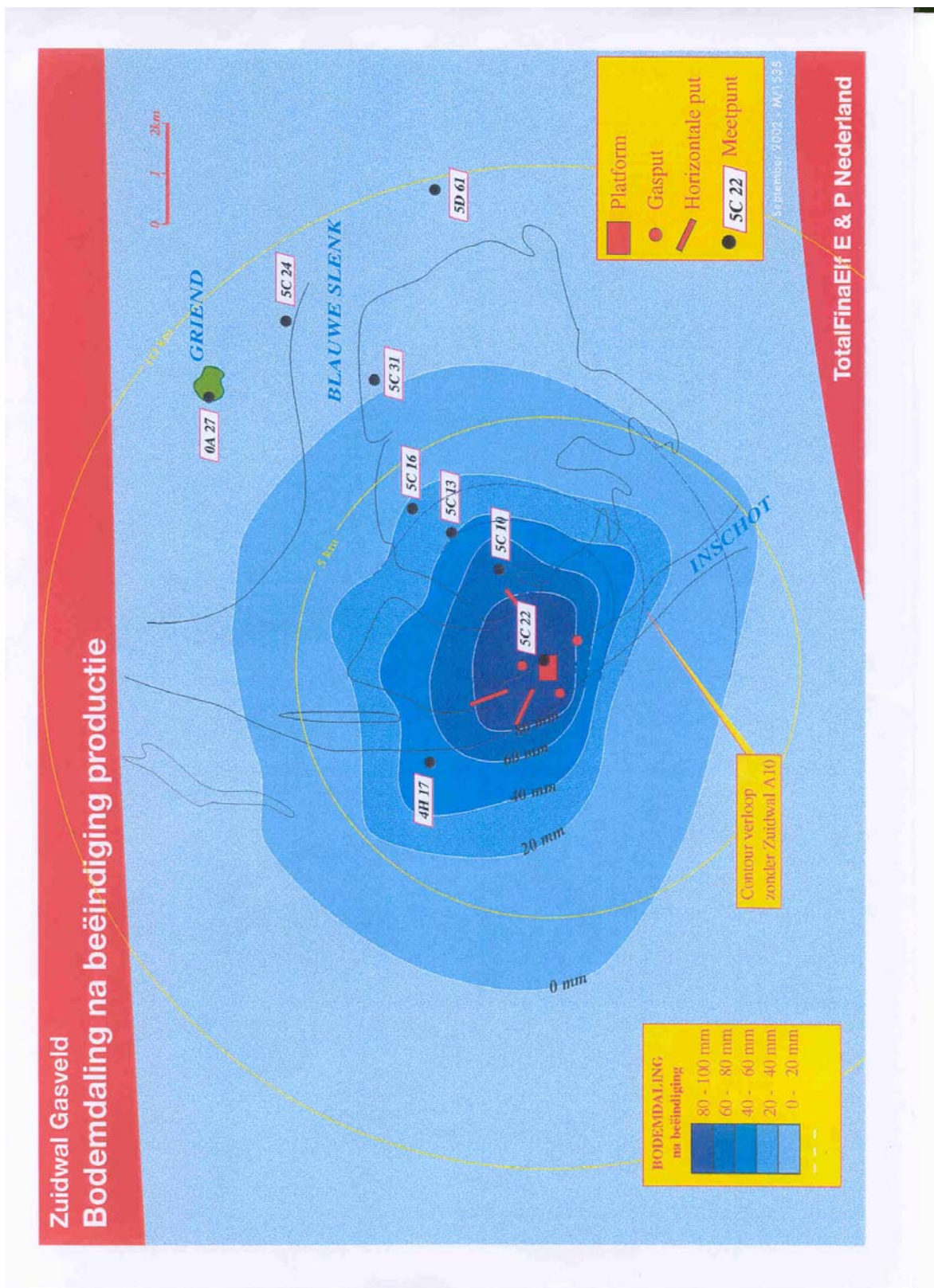
Totaal ($66,2 + 22,3$) = $88,5 \text{ mm}$.

Het volume (V) bodemdaling is dan ($V=0,5\pi R^2 h=1,57*(5500)^2*0,089=$)

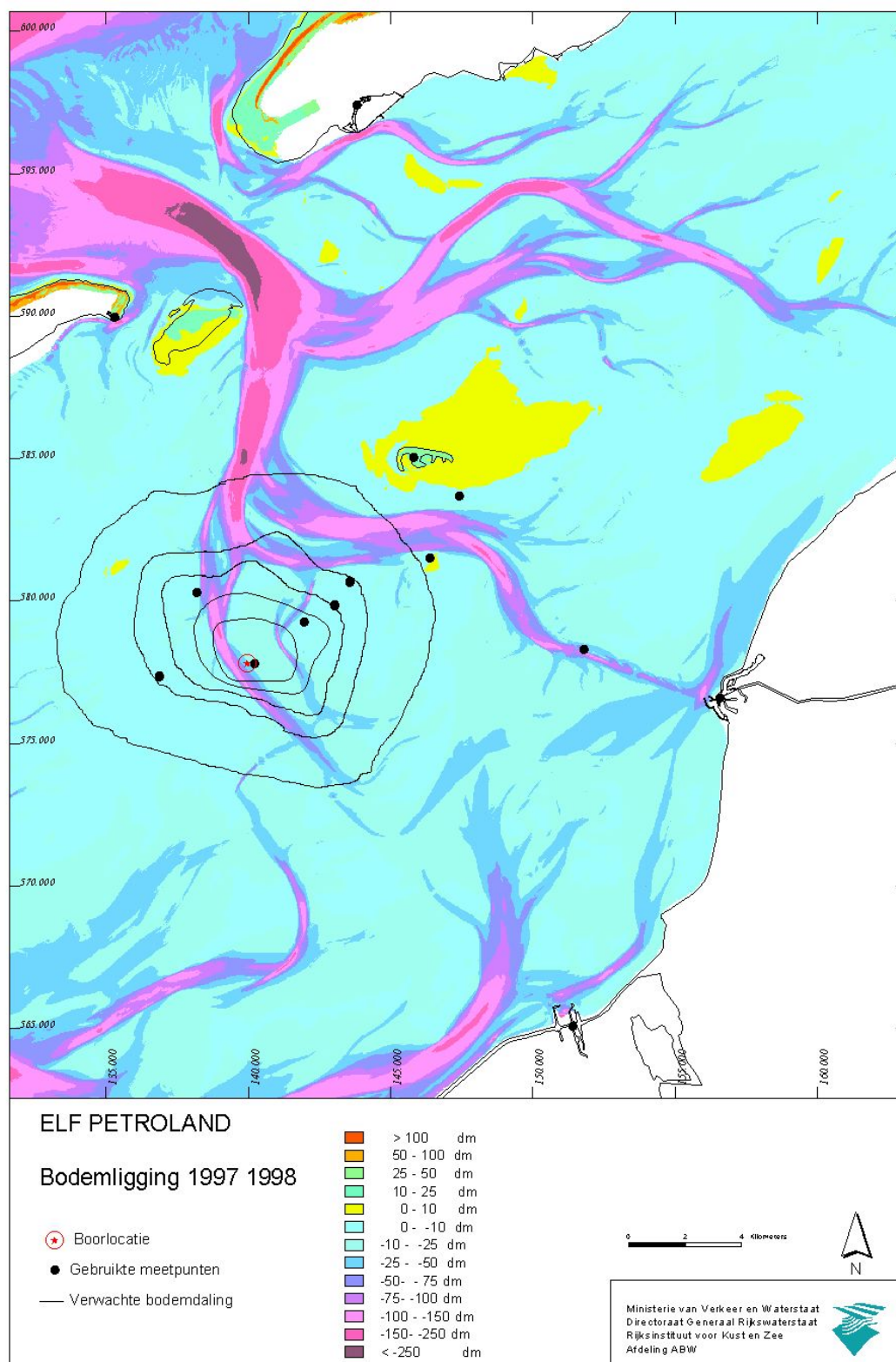
$4,23*10^6 \text{ m}^3$

Bijlage 4

Visualisatie van het voorspellingsmodel.

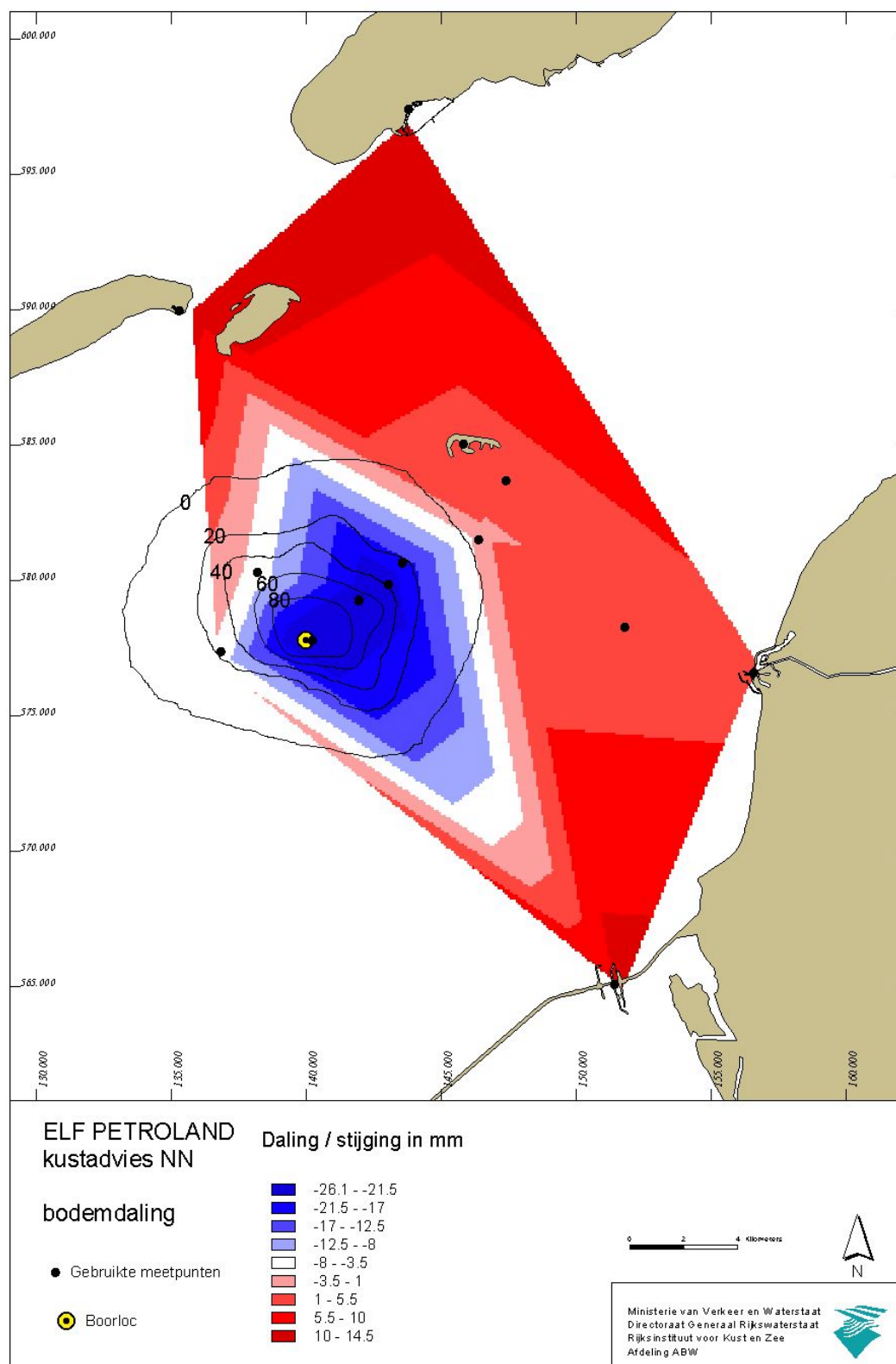


Bijlage 5
Voorspellingsmodel gecombineerd met het gebied.



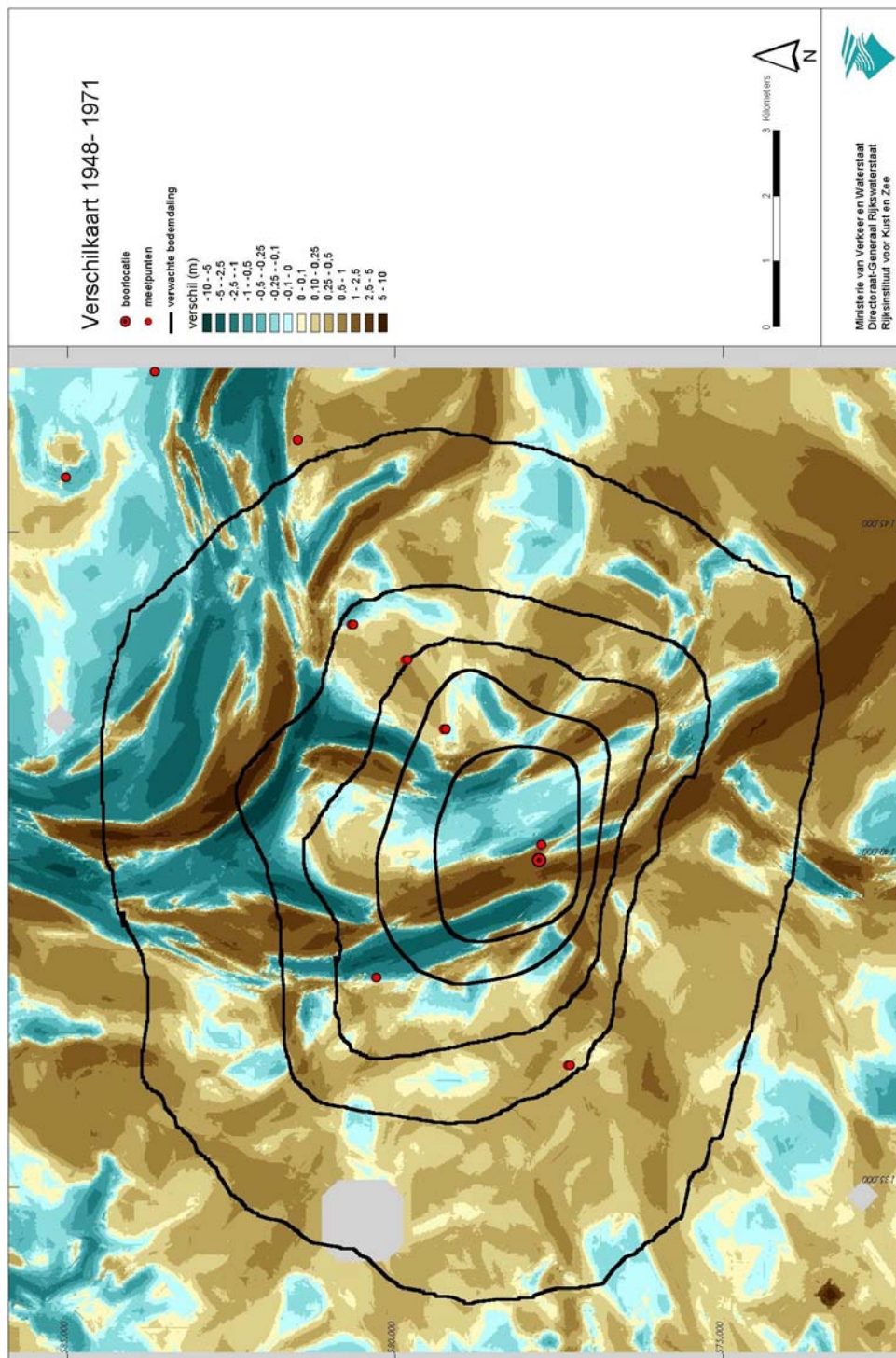
Bijlage 6

Interpolatiedata (1994-2000) gecombineerd met voorspellingsmodel.



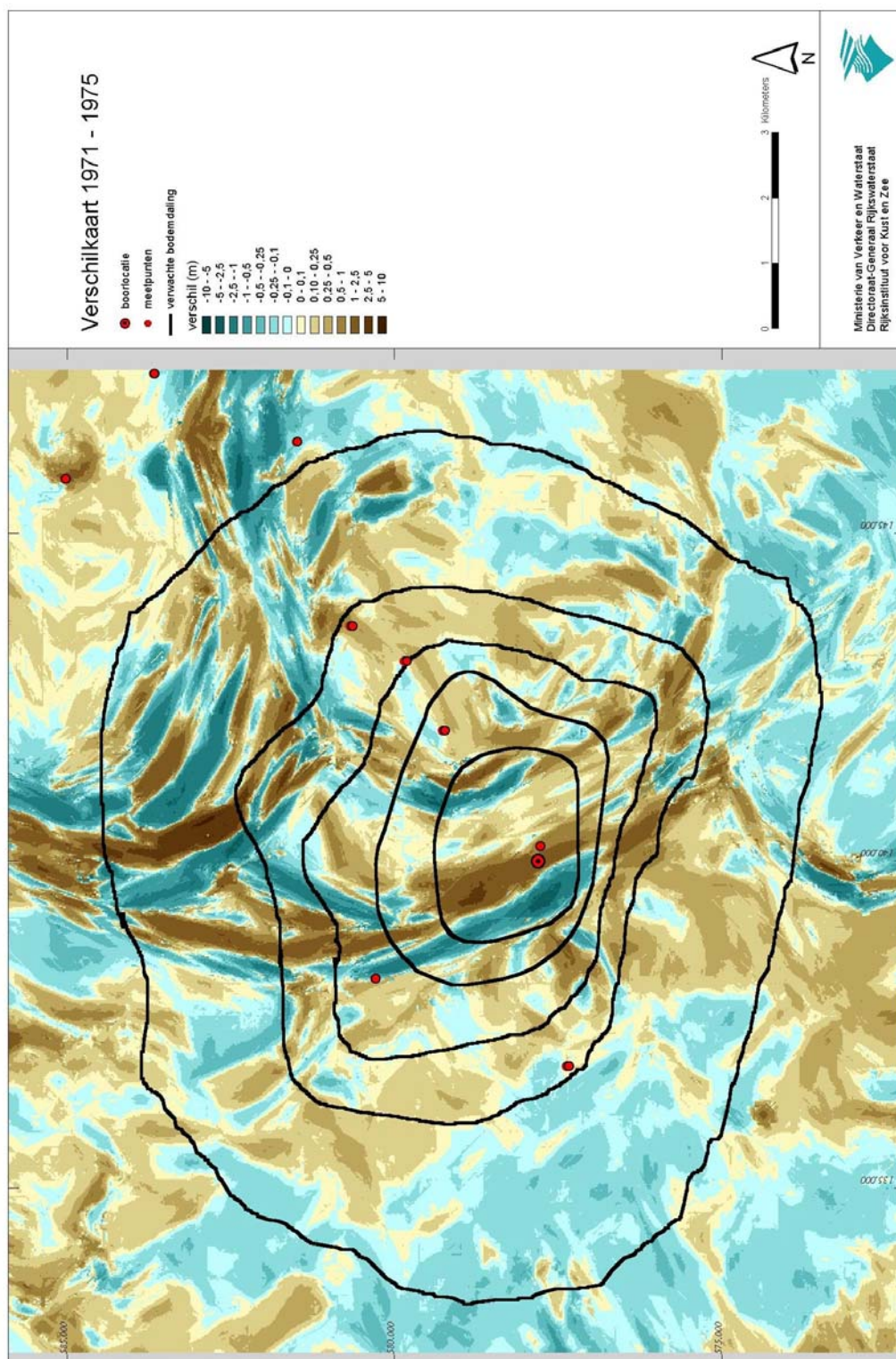
Bijlage 7

Situatie van het interessegebied voor sedimentatie en erosie, netto sedimentatie en erosie van het studiegebied.



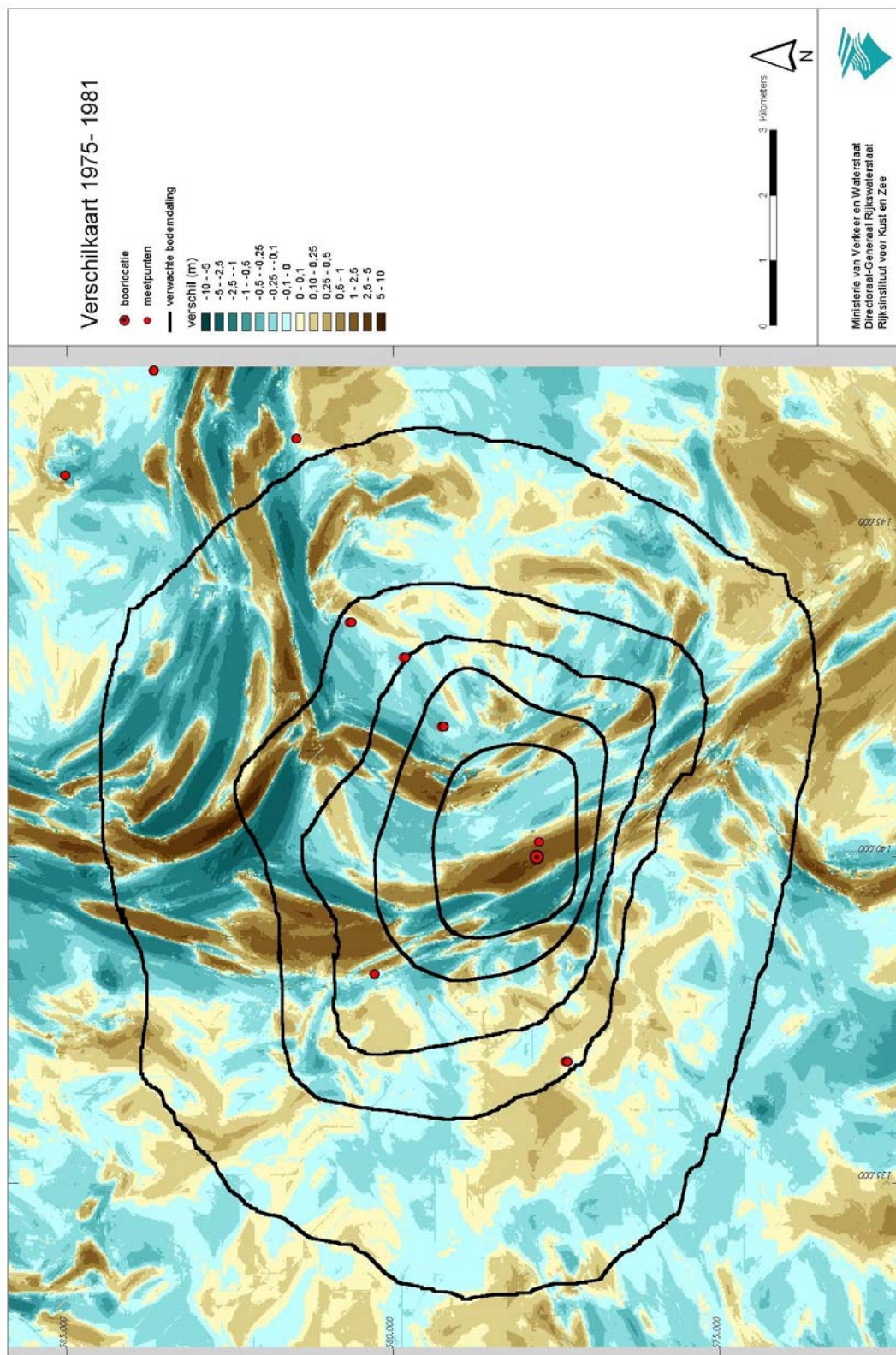
Bijlage 8

Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied.



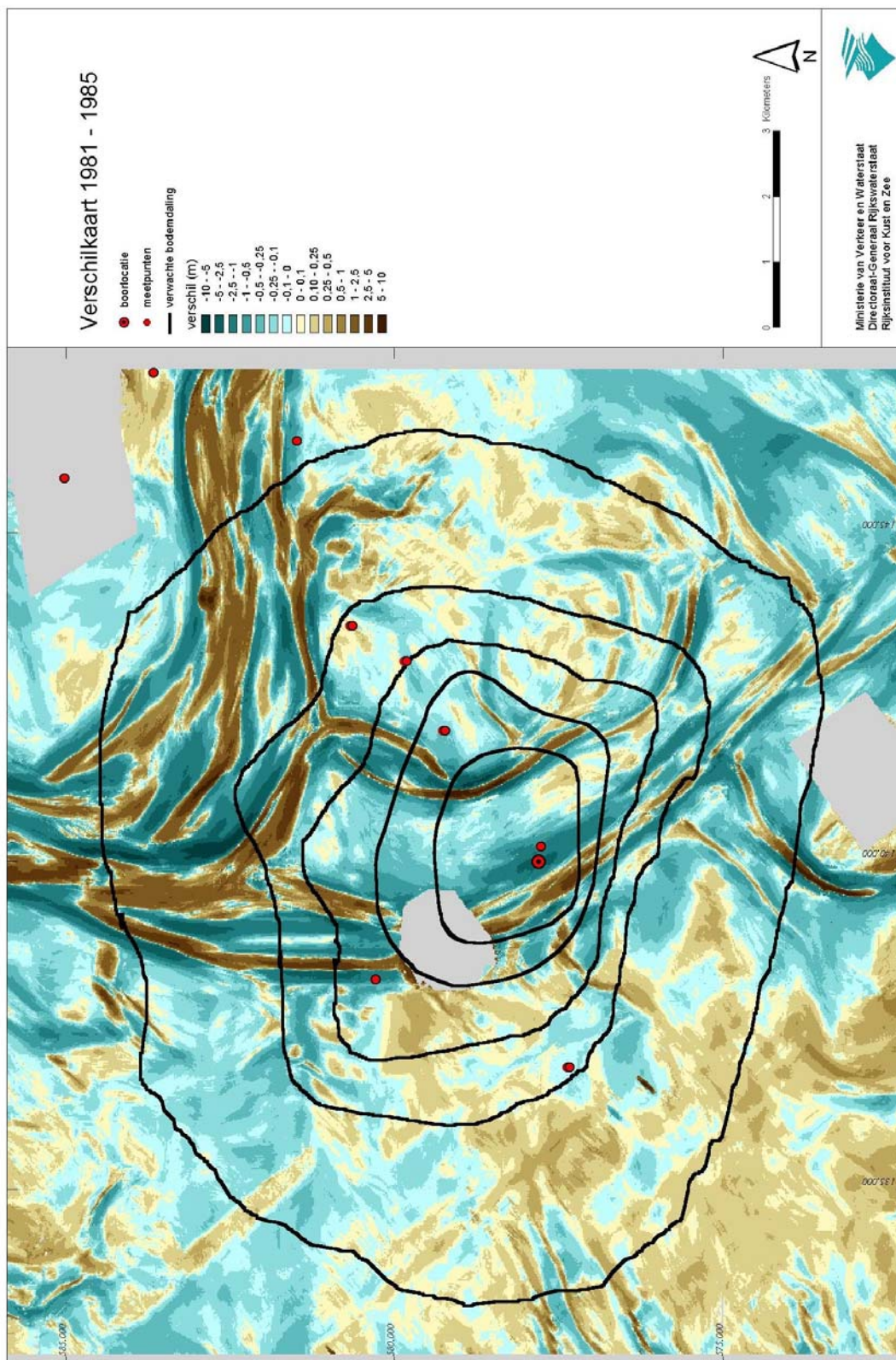
Bijlage 9

Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied.

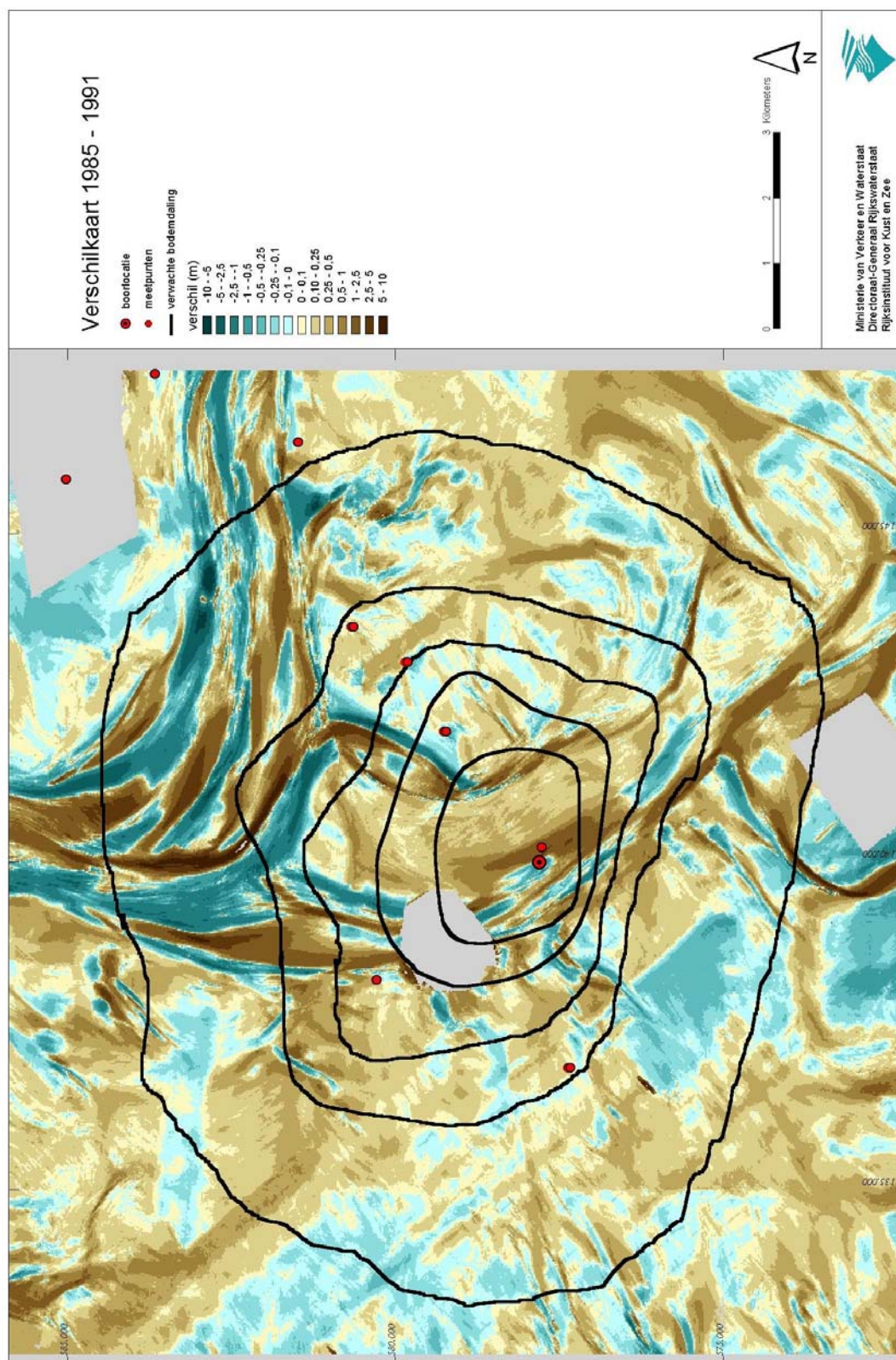


Bijlage 10

Netto sedimentatie en erosie van het studiegebied.



Bijlage 11
 Netto sedimentatie en erosie van het
 studiegebied.



Bijlage 12
 Netto sedimentatie en erosie van het
 studiegebied.

