

EXPERIMENT PARABOLISERING OP AMELAND

1993-2004

EINDRAPPORT



J.H. VAN BOXEL

P.D. JUNGERIUS

Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem Dynamica
Universiteit van Amsterdam

©2005

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	2
1. Inleiding	3
2. Locatiekeuze, planning en uitvoering van de ingreep	5
3. Monitoring en gegevensverwerking.....	9
3.1. Vervaardiging DTM en kaart van de uitgangssituatie	9
3.2. Interpolatieprocedure (Kriging)	9
3.3. Vervaardiging overige DTM's en kaarten	10
3.4. Verschilkaarten: Erosie, depositie en volumeberekeningen	10
4. Resultaten	11
4.1. Lengteprofiel en dwarsprofielen	11
4.2. Digitale Terrein Modellen (DTM's)	14
4.3. Verschilkaartjes.....	16
4.4. Volumeberekeningen	16
4.5. "Windpower" en zandverplaatsing	17
5. Discussie.....	21
6. Conclusies	23
7. Literatuurverwijzingen.....	25
Bijlage 1: Hoogtemetingen langs de raaien	27
Bijlage 2: Overzicht gebruikte filenamen bij maken nieuwe DTM's.....	29

Bij de voorpagina: Foto van het verstuivingsexperiment vanuit de lucht op 9 september 2004, kijkend naar het NNW. Een groot deel van de kuil is nog steeds actief.

Website: <http://www.science.uva.nl/~jboxel/Ameland>

VOORWOORD

Dit rapport beschrijft de resultaten van een in 1993 gestart verstuiwingsexperiment nabij het Rietpad op Ameland, dat als doel had om te onderzoeken of een kunstmatig aangebrachte kerf in de zeereep zonder verder ingrijpen actief kan blijven en zich kan ontwikkelen tot een paraboolduin. Het experiment paste in de strategie van de nota Kustverdediging na 1990 (Min. V&W 1990) om meer dynamiek in de zeereep toe te laten, uiteraard zonder dat de veiligheid van de zeereep wordt aangetast. In het experiment werden ervaringen toegepast die waren verworven in het EGM-project (Effect Gerichte Maatregelen tegen verzuring en eutrofiëring in droge duinen), waarin het stimuleren van overstuiving met kalkhoudend zand een maatregel was die verzuring tegengaat. Was in 1993 het introduceren van verstuiwingen nog omstreden, tegenwoordig is het een geaccepteerde maatregel die wordt toegepast in tal van natuurherstelprojecten die tot doel hebben de landschappelijke diversiteit en biodiversiteit in de duinen te vergroten.

Nadat het verstuiwingsexperiment Rietpad-Ameland gedurende 10 jaar (min of meer) jaarlijks was ingemeten, werd besloten om de jaarlijkse monitoring stop te zetten en het experiment af te sluiten met dit eindrapport. Het geeft antwoord op de vraag in hoeverre de doelstelling - het creëren van een verstuiwing die zonder verdere ingrepen actief blijft en eventueel leidt tot de vorming van een paraboolduin vanuit de zeereep - is bereikt. Een aantal zaken die in dit eindrapport wordt beschreven is al eerder in tussentijdse rapportages aan de orde gekomen, maar er is voor gekozen om in dit afsluitende rapport de belangrijkste zaken te herhalen. Om de omvang enigszins beperkt te houden zijn niet alle oorspronkelijke metingen of tussenresultaten opgenomen. Meer gegevens (vnl. afbeeldingen) zijn te vinden op de website: <http://www.science.uva.nl/~jboxel/Ameland>

Gedurende al de tijd dat het verstuiwingsexperiment op Ameland gevolgd werd hebben we altijd alle medewerking gehad van de medewerkers van Rijkswaterstaat, waarvoor wij hen zeer erkentelijk zijn. Met name Tony Overdiep stond altijd klaar met raad en daad. In het bijzonder willen we de medewerkers bedanken die de jaarlijkse hoogtemetingen hebben uitgevoerd, met name Rikus Oud en Cees Visser.

Amsterdam 2005,

J.H. van Boxel en P.D. Jungerius.

1. INLEIDING

Achtergrond

Al sinds mensenheugenis voeren Nederlanders strijd tegen de zee en het zand. Daarbij werd ondermeer gebruik gemaakt van stuifschermen, ter versterking van de duinvoet of voor het aanleggen van stuifdijken. Verstuivingen in de zeereep werden gestopt door het planten van helm of het leggen van takken. In de negentiende eeuw werd verstuiving in de binnenduinen problematisch, o.a. door overbegrazing. In 1898 werd daarom officieel vastgelegd dat iedere verstuiving in de duinen onmiddellijk moest worden gestabiliseerd.

Verstuivingen zijn echter ook belangrijk voor het handhaven van de biodiversiteit en de landschappelijke diversiteit in de duinen. Zij creëren kale oppervlakken die weer gekoloniseerd kunnen worden door pioniervegetaties (Van der Meulen et al. 1998). Bovendien wordt het oppervlak in de omgeving van een verstuiving overstoven met kalkhoudend, dan wel kalkrijk zand (Van der Meulen et al. 1996). Op sommige plaatsen vindt door de verstuiving erosie plaats tot (bijna) de grondwaterspiegel, waardoor vochtige milieus ontstaan.

Het verdwijnen van verstuivingen, door het stringente vastleggingsbeleid in de 20ste eeuw, maakt dat pioniervegetaties minder vaak voorkomen. De vegetatie wordt allengs dichter, waardoor vaak dichte grasmatten (of soms mosmatten) ontstaan (Van der Meulen et al. 1996). Na verloop van tijd nemen struiken de overhand. De toegenomen aanvoer van nutriënten (o.a. stikstof) vanuit de atmosfeer, met name in de tweede helft van de 20ste eeuw, heeft dit proces versterkt (Kooijman et al. 1998). De vergrassing, verstruiking, dan wel vermossing die aldus optraden hebben geleid tot een afname van de diversiteit van het landschap en de biodiversiteit in de Nederlandse duinen. De gestabiliseerde bodems worden in de loop van de tijd ontkalkt, een proces dat wordt gestimuleerd door zure regen en de aanvoer van nutriënten vanuit de atmosfeer. Kalkrijke milieus dreigen hierdoor uit de duinen te verdwijnen. Van de natte milieus in de duinen zijn de voedselarme varianten vanuit vegetatieoogpunt vaak het meest waardevol. Echter deze milieus hebben de neiging in de loop van de tijd steeds voedselrijker te worden door de ophoping van nutriënten, ook weer omdat via de atmosfeer volop stikstof wordt aangevoerd. Verstuivingen kunnen bijdragen tot het creëren van nieuwe voedselarme natte milieus.

Om de verarming van het duinlandschap een halt toe te roepen zijn in de negentiger jaren van de vorige eeuw tal van natuurherstelprojecten gestart. Bij een deel van die projecten wordt er naar gestreefd om de natte milieus voedselarm te houden door het afvoeren van nutriënten via maaien of plaggen (Van der Meulen et al. 1996, Veer 1998). Bij andere projecten wordt gepoogd de verstuiving opnieuw op gang te brengen om op die manier de landschappelijke diversiteit en de biodiversiteit in de duinen te herstellen (bijv. Arens, 2003, Arens et al. 2001, 2004). In de jaren voor de start van het project op Ameland werden door de Universiteit van Amsterdam ook verstuivingsprojecten gestart op Terschelling (Van der Meulen et al. 1996) en in de Middenheerenduinen nabij Velzen (Van Boxel et al. 1997). Later zijn op tal van andere plaatsen in de Nederlandse duinen soortgelijke projecten uitgevoerd (bijv.: Van Boxel & Jungerius 1994, Van Boxel et al. 1997, Arens et al. 1997).

Doelstelling

Het hier gerapporteerde project bij het Rietpad op Ameland had een meer geomorfologische doelstelling. Op een aantal plaatsen langs de Europese kust wordt de zeereep onderbroken door paraboolduinen die zich vanuit een kerf in de zeereep hebben ontwikkeld en zich uitstrekken in de primaire duinvallei achter de zeereep. De kerf is vaak door menselijk handelen tot stand gekomen, maar het effect is een aanzienlijke vergroting van de landschappelijke diversiteit. Goede voorbeelden vindt men aan de Franse kust, waar restanten van bunkers uit de Tweede Wereldoorlog op het strand aan de voet van de zeereep liggen die turbulentie veroorzaken en tot doorwaaiing van de zeereep leiden. Het vrijkomende zand wordt als een paraboolduin achter de zeereep teruggevonden. De laagte achter de zeereep is nodig voor de vrije ontwikkeling van het paraboolduin.

Doel van dit project was of om te onderzoeken of een kustmatig gecreëerde kerf ook langs onze kust zonder verdere bemoeienis in verstuiwing kan blijven en kan leiden tot een paraboolduin in de aangrenzende laagte achter de zeereep. Het project paste in het regeringsbeleid, geformuleerd in de nota Kustverdediging na 1990 (Min. V&W 1990), om meer dynamiek in de zeereep toe te laten, zonder dat de veiligheid van de zeereep wordt aangetast. Meer in het bijzonder was het voor Rijkswaterstaat belangrijk om te weten hoe het transport vanuit de zeereep naar het achterland plaatsvindt, of een kerf leidt tot een doorbraak van het duin en of het zand ver het binnenland inwaait, dan wel dicht bij de verstuiwing blijft.

Om dit te onderzoeken is in een oude zeereep nabij het Rietpad op Ameland een verstuiwing in gang gezet, die in de loop van de jaren een aantal malen gemonitord is. In eerdere rapporten (Van Boxel & Jungerius 1992, 1993, 1996, 1997) werd al beschreven hoe de locatie gekozen is en hoe de ingreep voorbereid en uitgevoerd. Van Boxel & Jungerius 1996 beschrijft bovendien de eerste resultaten (t/m 1995) en in Van Boxel & Jungerius 1997 wordt dit aangevuld met de resultaten over 1996 en 1997.

In dit afsluitende rapport wordt eerst in hoofdstuk 2 nog eens de voorbereiding en uitvoering van de ingreep samengevat. Hoofdstuk 3 beschrijft vervolgens hoe de monitoring is uitgevoerd. Omdat de gebruikte software sinds 1997 verbeterd is zijn alle kaartjes (ook die van voor 1997) opnieuw geïnterpoleerd. Dit heeft overigens niet tot erg grote verschillen geleid. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de monitoring over de jaren 1993-2004 besproken om vervolgens over te gaan tot de discussie (hoofdstuk 5) en de conclusies (hoofdstuk 6).

2. LOCATIEKEUZE, PLANNING EN UITVOERING V/D INGREEP

Om een kans te hebben dat een verstuiwing zich tot een paraboolduin ontwikkelt moet de locatie aan een aantal eisen voldoen:

- Het duin waarin de verstuiwing wordt gecreëerd moet goed geëxponeerd liggen ten opzichte van de wind, met zo min mogelijk obstakels in het voorterrein. Een verstuiwing in de zeereep heeft daarom de voorkeur. Op een hoge zeereep zullen de windsnelheden hoger zijn dan op een lage zeereep.
- Er moet voldoende zand aanwezig om tot paraboolvorming te komen. Het duin moet dus voldoende hoog zijn.
- De ingreep mag de andere duinfuncties niet aantasten, zoals zeewering, natuurgebied recreatie en evt. waterwinning.

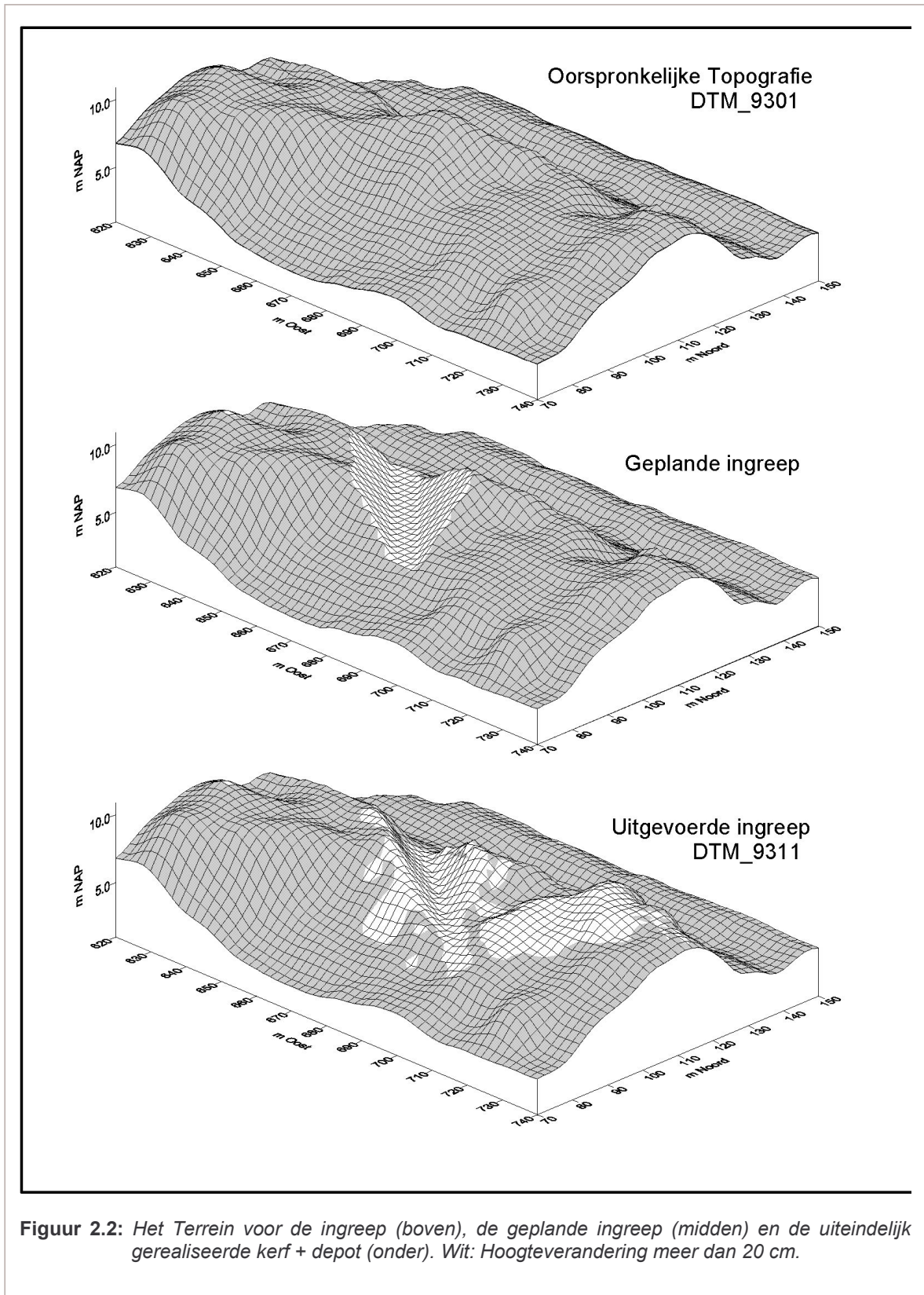
Met behulp van luchtfoto's is gezocht naar geschikte locaties. Locaties in de Zwanenwaterduinen en het Oerderduin werden afgewezen om veiligheidsredenen, of de nabijheid van broedvogels die verstoord zouden worden als mensen in de duinen de verstuiwing zouden gaan bekijken. Uiteindelijk is gekozen voor de locatie Rietpad nabij strandpaal 4.000. de coördinaten van deze strandpaal in het Rijksdriehoeknet zijn 171.767, 608.133.



Figuur 2.1: Foto van de omgeving van het Rietpad voor de ingreep, kijkend naar het NNW. De fossiele stuifkuil op de voorgrond (locatie 171.630,608.090) is gestabiliseerd met behulp van takken. De laagte daarachter, met riet en struiken is een primaire duinvallei. Aan de horizon is de nieuwe zeereep nog net te onderscheiden.

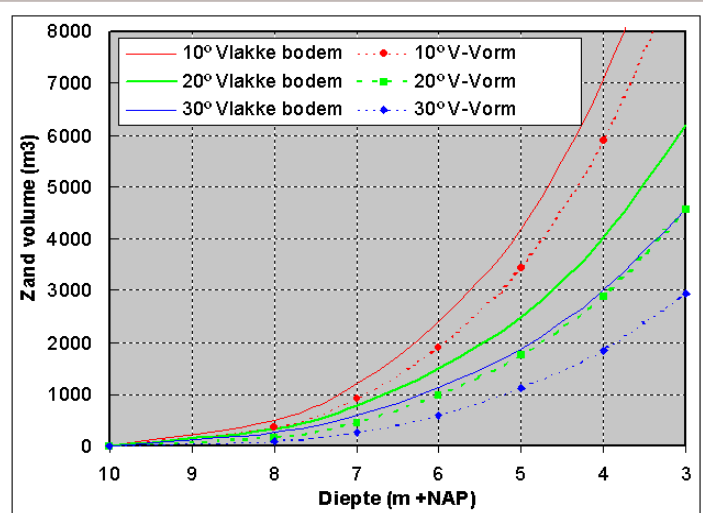
Het gebied is gedigitaliseerd vanaf de 1:2000 kustkaart van 1990. Er zijn drie mogelijk locaties (RP1, RP2 en RP3; zie Van Boxel & Jungerius 1992, 1993) voor een kerf bepaald op grond van het voorterrein (i.v.m. de wind) en reeds aanwezige fossiele kuilen (minder zand te verplaatsen). Voor ieder van die locaties is een ingreep ontworpen met een vlakke bodem van 3 m breed en zijwanden met verschillende hellingshoeken (voor een voorbeeld zie figuur 2.2). Vervolgens is voor iedere locatie berekend hoeveel zand verplaatst zou moeten worden als functie van de diepte waarop de vlakke bodem zou komen en de hellingshoeken van de zijwand (Figuur 2.3).

Ingreep RP1 was WNW-OZO georiënteerd, en de ingrepen RP2 en RP3 hadden een NW-ZO oriëntatie (Van Boxel & Jungerius 1992, 1993). De voorkeur werd gegeven aan een NW-ZO oriëntatie, omdat vanuit het NW de meeste hoge windsnelheden werden verwacht. Aan de Hollandse kust hebben de meeste stuifkuilen een ZW-NO oriëntatie omdat hoge windsnelheden daar het vaakst uit het ZW komen. Op de waddeneilanden komen de ZW winden echter over het eiland en komen krachtige winden vaker uit het NW, hetgeen ook tot uiting komt in de oriëntatie van bestaande stuifkuilen.



Figuur 2.2: Het Terrein voor de ingreep (boven), de geplande ingreep (midden) en de uiteindelijk gerealiseerde kerf + depot (onder). Wit: Hoogteverandering meer dan 20 cm.

Ingrep RP1 (Van Boxel & Jungerius 1992) werd afge-
wezen omdat deze de zeereep
niet geheel doorsnijdt en RP2
(Van Boxel & Jungerius 1992)
omdat bij realisering van deze
verstuiving mogelijk te veel
zand zou komen in het lage,
natte gebied ten zuiden van de
kerf met daarin een waardevolle
vegetatie. Het advies (Van
Boxel & Jungerius 1993) was
om kerf RP3 te realiseren. De
voorgestelde kerf, RP3, had
hellingen van 20°, een vlakke
bodem van 3 m breed op 6.0 m
+NAP en liep door een al
aanwezige kuil. Hierbij zou
1490 m³ zand verplaatst moeten
worden.

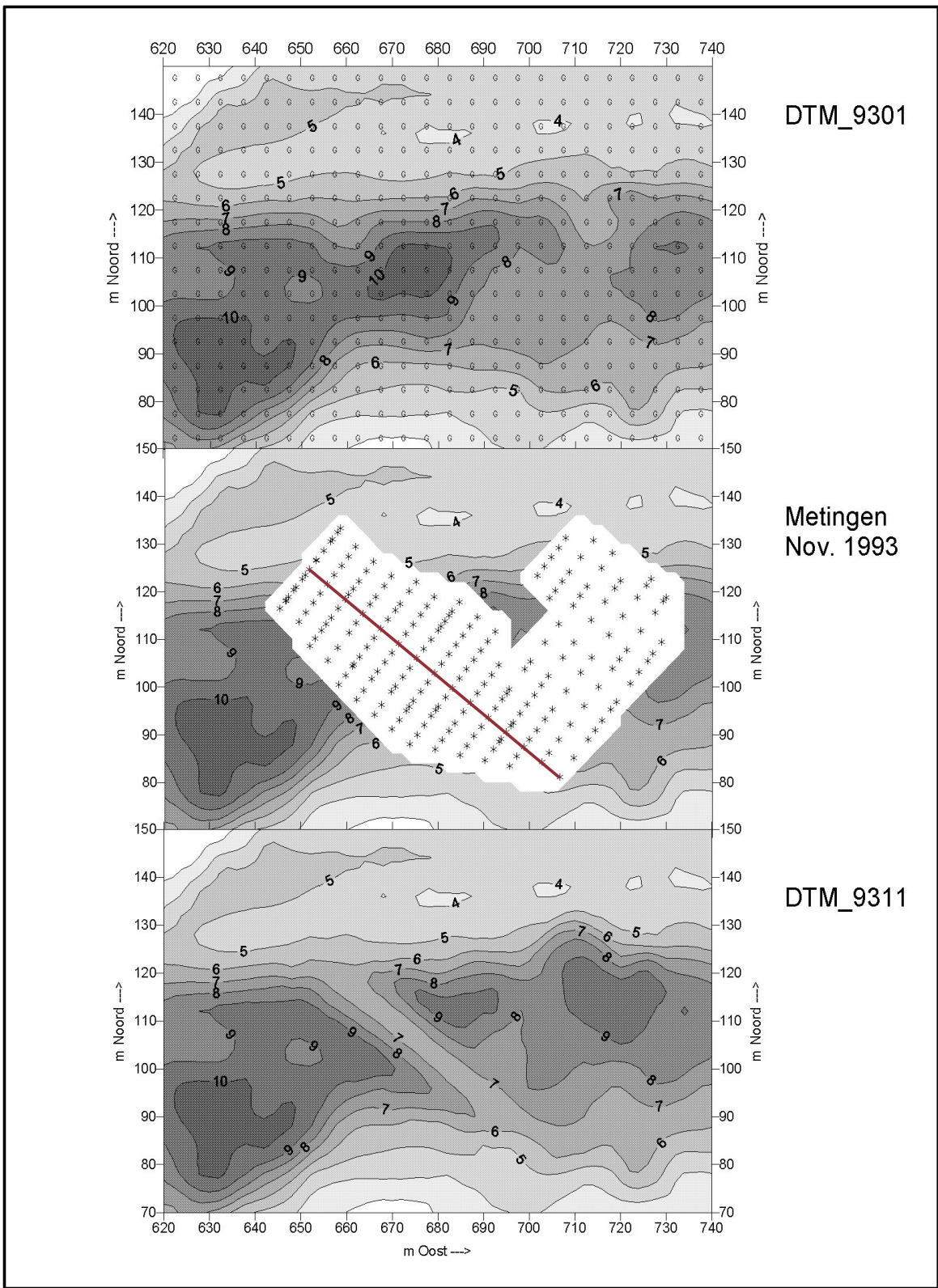


Figuur 2.3: Volume van de te verplaatsen hoeveelheid zand voor locatie RP3 als functie van Het niveau van de bodem (diepte) en de helling van de zijwanden voor ingrepen met een vlakke bodem van 3 m breed en zonder vlakke bodem (V-vorm).

De ingreep is uitgevoerd in de eerste week van november 1993. De kerf die uiteindelijk gerealiseerd is lag nog iets verder naar het oosten dan RP3. Hierdoor moest een hoger duin doorsneden worden en bovendien over een grotere lengte, zodat er veel meer zand verplaatst zou moeten worden. Er is echter geen vlakke bodem gecreëerd, waardoor veel minder zand verplaatst moest worden en bovendien is de kerf iets minder diep uitgegraven. Uit een vergelijking van het oorspronkelijke terrein en het terrein na de ingreep bleek dat hierbij ongeveer 1100 m³ zand verplaatst was. Het belangrijkste nadeel van het verplaatsen van de kerf naar het oosten was dat er nu een boom staat juist in de noordwest richting in het verlengde van de kerf. De vrees bestond dat deze boom de windsnelheid vanuit de belangrijkste transportrichting nadelig zou beïnvloeden.



Figuur 2.4: Foto van de kerf direct na de ingreep (november 1993) kijkend in de NO-richting. De afdrukken van de graafmachine zijn nog duidelijk zichtbaar. In de rechtsbovenhoek is een deel van het depot te zien, waar het afgegraven zand weggelegd is.



Figuur 3.1: Werkwijze bij verwerking DTM's. Boven oorspronkelijk DTM voor de ingreep (met daarin aangegeven de punten van waaruit verrasterd is). Midden de uitsnede + nieuw ingemeten punten. Onder het nieuwe DTM. De contourlijnen geven de hoogte in m +NAP.

3. MONITORING EN GEGEVENSVERWERKING

Op grond van de kustkaart is eerst een digitaal terrein model (DTM) gemaakt voor de uitgangssituatie. Direct na de ingreep en in de jaren daarop volgend zijn geregeld delen van het terrein opnieuw ingemeten. Deze nieuwe gegevens zijn successievelijk ingepast in de bestaande kaart. Door kaarten van jaar tot jaar met elkaar te vergelijken kon worden bepaald waar en hoeveel erosie en depositie had plaatsgevonden. De procedures die gevolgd werden bij al deze berekeningen worden in dit hoofdstuk beschreven.

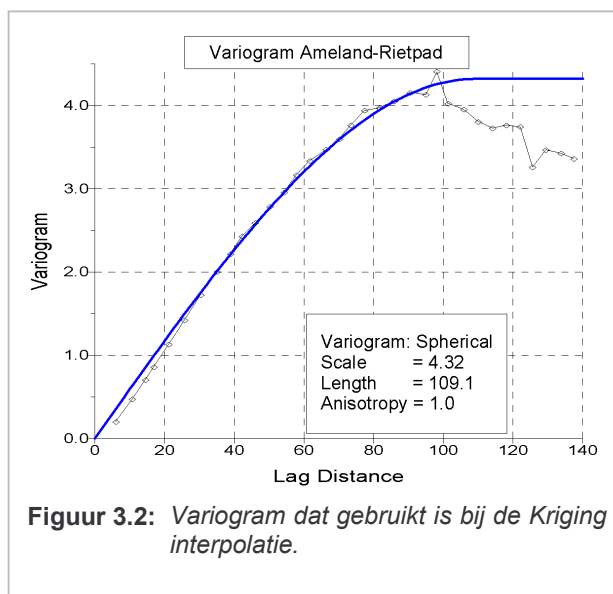
3.1 Vervaardiging DTM en kaart van de uitgangssituatie

Voor vastleggen van de uitgangssituatie is gebruik gemaakt van de Kustkaart Ameland van 1990 (1:2000 en hoogtelijnen per meter). Vanaf de kustkaart is van een groot aantal punten de hoogte afgelezen op een regelmatig grid van 5 m bij 5 m. Daarbij is tussen de hoogtelijnen op het oog geïnterpoleerd tot een verticale resolutie van 10 cm. Hoewel het gebied van X=171.400 tot 171.800 en Y=608.00 tot 608.200 (Rijksdriehoeknet) gedigitaliseerd is, zijn voor dit rapport alleen de gegevens gebruikt van X=171.620 tot 171.740 en Y=608.070 tot 608.150. Met behulp van kriging (sferisch variogram) zijn deze meetpunten geïnterpoleerd tot een raster met de gewenste gridafstand (2x2 m²).

Zowel de afstand tussen de rasterpunten die afgelezen zijn uit de hoogtekaart, als fouten in de hoogtekaart, als de handmatige interpolatie kan leiden tot fouten in het berekende DTM (digitaal terrein model). Uit een vergelijking van de oorspronkelijke kaart met opnieuw ingemeten terreindelen blijkt dat de fouten niet erg groot zijn en geen grote invloed hebben op de berekende volumes. De hoogtelijnen van het berekende DTM worden getoond in figuur 3.1 boven. Hier zijn ook de punten aangegeven die zijn uitgelezen vanaf de hoogtekaart en van waaruit het DTM geïnterpoleerd is.

3.2 Interpolatieprocedure (Kriging)

Voor het verrasteren is gebruik gemaakt van kriging m.b.v. Surfer™ 7.0 for Windows. Pottjegort et al. (1996) vergeleken diverse interpolatiemethoden voor dit gebied (de kerf+omgeving). Uit een kruisvalidatie bleek dat sferische of Gaussische variogrammen de laagste schattingsfout gaven. De methode met de kleinste kruisvalidatiefout (Radial basics functions) is niet gebruikt omdat deze matig gedocumenteerd is. Bovendien geeft deze methode geen informatie over de ruimtelijke spreiding van de schattingsfout.



Figuur 3.2: Variogram dat gebruikt is bij de Kriging interpolatie.

Met behulp van Surfer™ is op afgelezen hoogten (gedigitaliseerd vanaf de kustkaart) een variogram gefit (Zie figuur 3.2). Een goede fit werd verkregen door gebruik te maken van een sferisch variogram zonder nugget (Nugget=0, Variantie=4.32m², Range=109m, geen anisotropie).

De weliswaar in het terrein aanwezige anisotropie werd genegeerd, omdat het afgeleide variogram ook zal worden gebruikt bij de interpolatie van de metingen na de ingreep en de ingreep een hoek maakt met het reeds aanwezige duin (en dus een andere anisotropierichting heeft). Dat het variogram voor Lag-afstanden van meer dan 100 m niet goed meer fit is niet belangrijk omdat voor de interpolatie toch steeds de 24 dichtstbijzijnde punten worden gebruikt (6 in iedere sector van 90°). Door wel gebruik te maken van anisotropie zou de schattingsfout nog enigszins teruggebracht kunnen worden.

3.3 Vervaarding overige DTM's en kaarten

Na de ingreep is een deel van het terrein (kerf en depot) november 1993 opnieuw ingemeten door Rijkswaterstaat door middel van waterpassing. Hierbij is een hoofdraai uitgezet langs de lengteas van de kerf. Loodrecht op deze hoofdraai zijn op iedere vijf meter dwarsraaien ingemeten (voor de ligging van de opnieuw ingemeten punten zie figuur 3.1 midden). Februari 1994 zijn nog een aantal raaien extra ingemeten.

September 1994 is de kerf en omgeving ingemeten door het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium m.b.v. een tachymeter (elektronische versie van een theodoliet). Daarna is het terrein nog een aantal maal opnieuw ingemeten door Rijkswaterstaat middels waterpassing (zie tabel 3.1).

Uit het oorspronkelijke DTM (DTM_9301) zijn de punten in het opnieuw ingemeten gebied verwijderd. Vervolgens zijn de in november 1993 nieuw ingemeten punten toegevoegd (zie figuur 3.1 midden). Dit geheel is vervolgens opnieuw verrasterd tot een nieuw DTM (DTM_9311, zie figuur 3.1 onder). Deze procedure is steeds herhaald als weer een deel van het terrein opnieuw ingemeten was.

Nov. 1993	Feb. 1994	Sep. 1994*
Feb. 1995	Okt. 1996	Juli 1997
Nov. 1998	Aug. 1999	Mrt. 2002
Nov. 2002	Jan. 2004	

Tabel 3.1: *Maanden waarin hoogtemetingen hebben plaatsgevonden door RWS of UvA (* = meting door UvA).*

3.4 Verschilkaarten: Erosie, depositie en volumeberekeningen

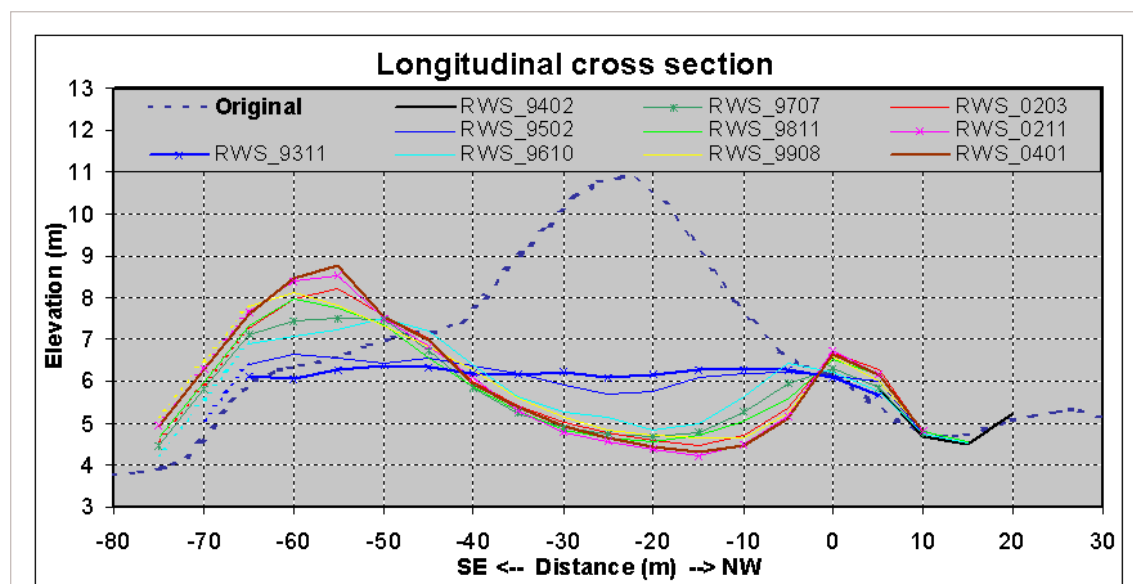
Door verschillende DTM's te vergelijken kan worden bepaald op welke plaatsen erosie (deflatie) heeft plaats gevonden en waar het zand weggelegd is (accumulatie) en hoe groot de hoogteveranderingen zijn. Bovendien kan worden berekend welke volumes zand verplaatst zijn. Dit alles uiteraard onder de voorwaarde dat het gehele gebied, waarin daadwerkelijk veranderingen hebben plaatsgevonden, ook opnieuw ingemeten is en dat het DTM aan het begin van de beschouwde periode voldoende nauwkeurig was.

4. RESULTATEN

Dit hoofdstuk bespreekt eerst de resultaten van de metingen langs de lengte- en dwarsprofielen. Vervolgens wordt in paragraaf 4.2 aan de hand van de daaruit berekende DTM's (digitale terrein modellen) de globale ontwikkeling van de kerf behandeld. In paragraaf 4.3 komen dan de veranderingen van jaar tot jaar aan de orde en in paragraaf 4.4 wordt nog gekeken naar de volumes verplaatst zand en het oppervlak waarover erosie, dan wel depositie plaatsvindt. Tenslotte worden in paragraaf 4.5 de zandverplaatsingen gecorreleerd met windsnelheden en windrichtingen.

4.1 Lengteprofiel en dwarsprofielen

De metingen door Rijkswaterstaat geschieden steeds langs dwarsraaien, die loodrecht op de hoofdraai stonden. In deze paragraaf worden de metingen langs enkele kenmerkende raaien besproken. Een compleet overzicht van de metingen langs alle raaien is te vinden in bijlage 1.

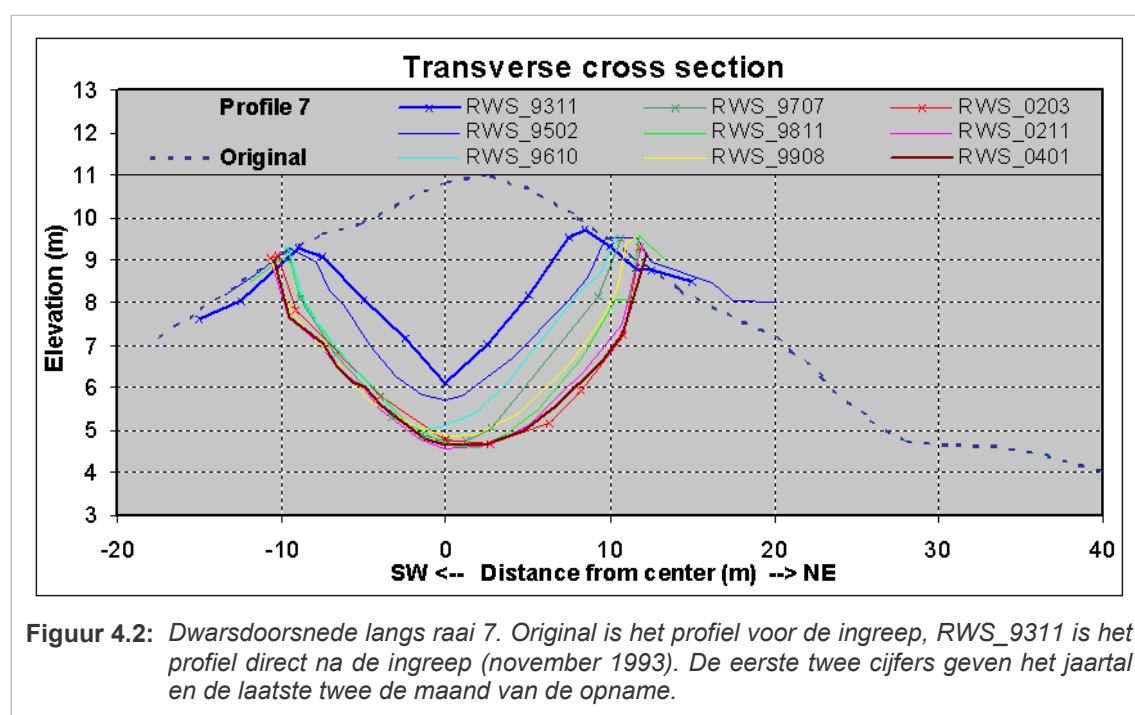


Figuur 4.1: Hoogtemetingen langs de hoofdraai. Original is het profiel voor de ingreep, RWS_9311 is het profiel direct na de ingreep (november 1993). De eerste twee cijfers geven het jaartal en de laatste twee de maand van de opname. De stippellijnen tussen -65 en -75 m zijn extrapolaties en berusten niet op metingen.

Figuur 4.1 toont de metingen zoals die in de verschillende jaren zijn gedaan langs de hoofdraai. Voor de ingreep lag juist ter hoogte van de ingreep een duin van 11 m hoogte (fig 4.1 Original). Bij de ingreep is door dit duin een kerf gegraven tot circa +6 m NAP (RWS_9311). De hoofdraai loopt langs de lengteas, door het diepste punt van de gegraven kerf. In de jaren na de ingreep vindt een vrij consistente ontwikkeling plaats, met erosie in het begin en het centrum van de ingreep (van 0 tot -40 m) en de meeste depositie aan de ZO kant. Van lieverlee krijgt het lengteprofiel de vorm van het lengteprofiel van een stuifkuil, met een drempel aan de windwaartse kant, gevolgd door een relatief steile helling (17° in RWS_0401) en een depressie. De helling aan de lijzijde is minder steil (in RWS_0401 5-10°; alleen het

laatste stukje is steiler, nl. 13°), maar het duin hoger. Op het diepste punt is de kuil circa twee meter dieper geworden, terwijl aan de lizijde een pakket zand is afgezet dat plaatselijk ruim 2.5 m dik is. Ook de zuidoostenwinden hebben bijgedragen aan het zandtransport, getuige de depositie die heeft plaatsgevonden aan de NW kant van de ontstane stuifkuil (zie figuur 4.4).

Figuur 4.2 toont het dwarsprofiel ter hoogte van raai 7 (X=-25 m op de hoofdraai). De gegraven kerf (RWS_9311) had zijwanden met hellingen van circa 20°. Al in het eerste jaar na de aanleg verandert de V-vormige doorsnede in een meer U-vormige doorsnede. In de eerste 15 maanden wordt op sommige plaatsen meer dan een meter zand geërodeerd (RWS_9502). De jaren daarna gaat de erosie gestaag verder met in de laatste meting (RWS0401) op sommige plaatsen meer dan 3.5m erosie in vergelijking met de uitgangssituatie (RWS_9311). De meting van februari 1995 lijkt tevens aan te geven dat in de eerste 15 maanden nog wel wat zand over de rand van de stuifkuil getransporteerd is (RWS_9502). In latere jaren is dat nog nauwelijks het geval (RWS_9811 valt buiten de kuil vrijwel samen met RWS_9502).

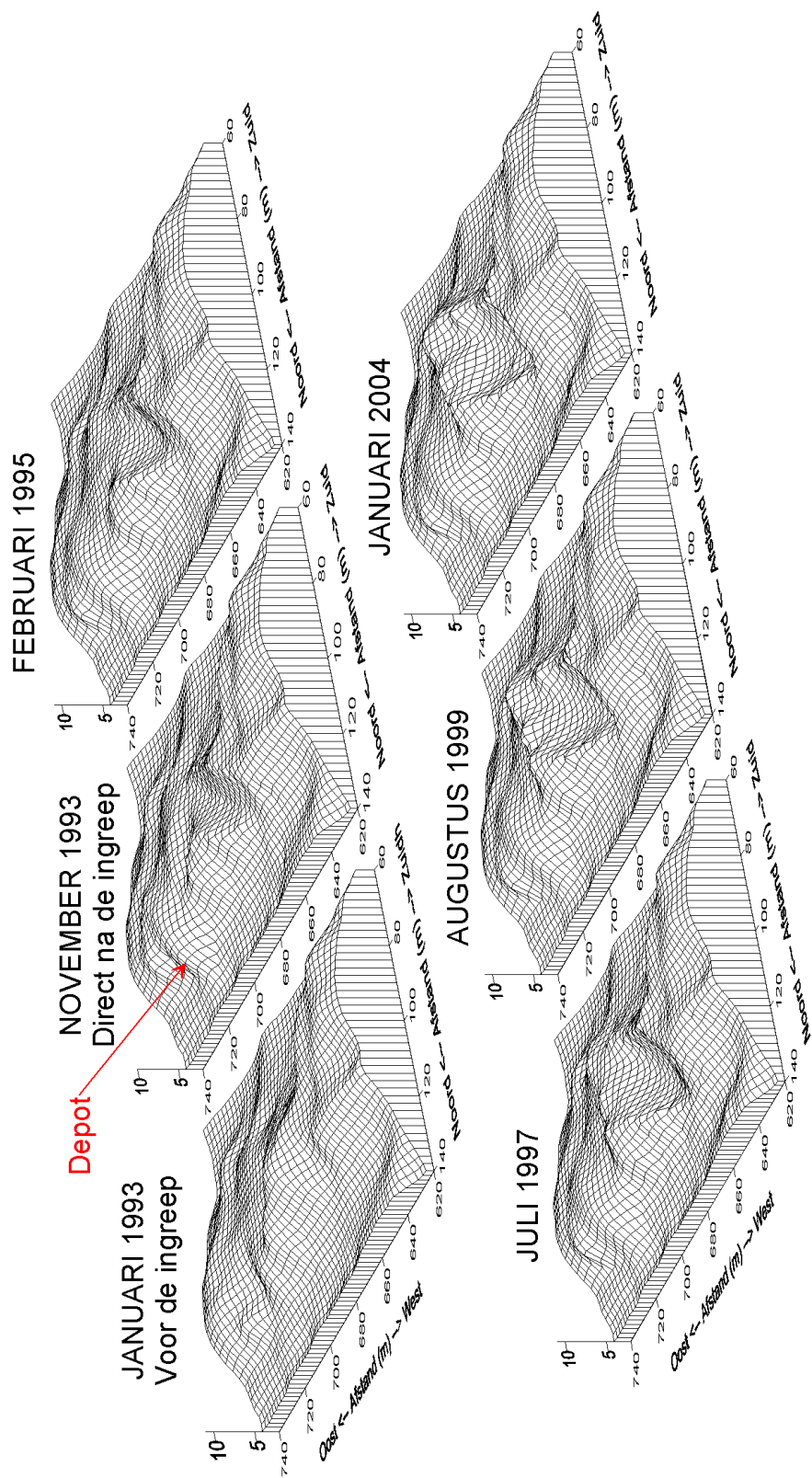


Figuur 4.2: Dwarsdoorsnede langs raai 7. Original is het profiel voor de ingreep, RWS_9311 is het profiel direct na de ingreep (november 1993). De eerste twee cijfers geven het jaartal en de laatste twee de maand van de opname.

Er is aan de NO-zijde meer zand geërodeerd dan aan de ZW-zijde van de kerf. Dit is vooral het geval in de profielen 7, 8 en 9 en niet in de meer NW gelegen dwarsraaien. Het gevolg is dat de lengteas heel licht gedraaid is ten opzicht van de oorspronkelijke ingreep.

Bij profiel 7 (figuur 4.2) en 8 (bijlage 1) is aanvankelijk een beetje zand over de NO-rand gewaaid. In latere jaren zijn deze raaien slechts ingemeten tot de rand van de stuifkuil, omdat verderop op het oog geen vers zand waarneembaar was. In raai 9 en 10 (bijlage 1) is veel zand over de NO-rand gewaaid en een beetje over de ZW-rand. Ter hoogte van raai 10 is aan de NO-kant van de kuil een duin van 2 m hoogte weggelegd bovenop het oorspronkelijke oppervlak.

Vanaf raai 11 (zie bijlage 1) vindt er voornamelijk depositie van zand plaats, aanvankelijk nog in twee aparte lobben (raai 11), maar verderop over de gehele breedte. In raai 11 en 13 is de dikte van het afgezette pakket plaatselijk 2.5 m en in raai 14 zelfs 3.0 m.



Figuur 4.3: Digitale terreinmodellen van het gebied door de jaren heen.

De belangrijkste transportrichtingen zijn van NW naar ZO en van W naar O, overeenkomstig de windrichtingen waar de hoogste windsnelheden vandaan komen. Tijdens oostenwinden wordt echter ook zand getransporteerd van O naar W, getuige de afzettingen in de raaien 1, 2 en 3 (bijlage 1). In raai 1 is de afzetting plaatselijk 1 m dik, hetgeen ook vastgelegd is in de foto in figuur 4.4.



Figuur 4.4: Foto van de afzetting van zand aan de NW-zijde van de ingreep.

Ook karakteristiek is dat op één plaats afwisselend erosie en depositie kunnen voorkomen. Soms is dat systematisch, zoals in raai 3 tussen -2 en -8 m, waar van nov. '93 tot juli '97 voortdurend erosie plaatsvindt, terwijl daarna alleen nog zand wordt afgezet. Soms worden tijdelijk “zandbankjes” afgezet, welke later weer eroderen. Verschillende voorbeelden hiervan zijn te zien in profiel 6, tussen +2 en +8 m.

4.2 Digitale Terrein Modellen (DTM's)

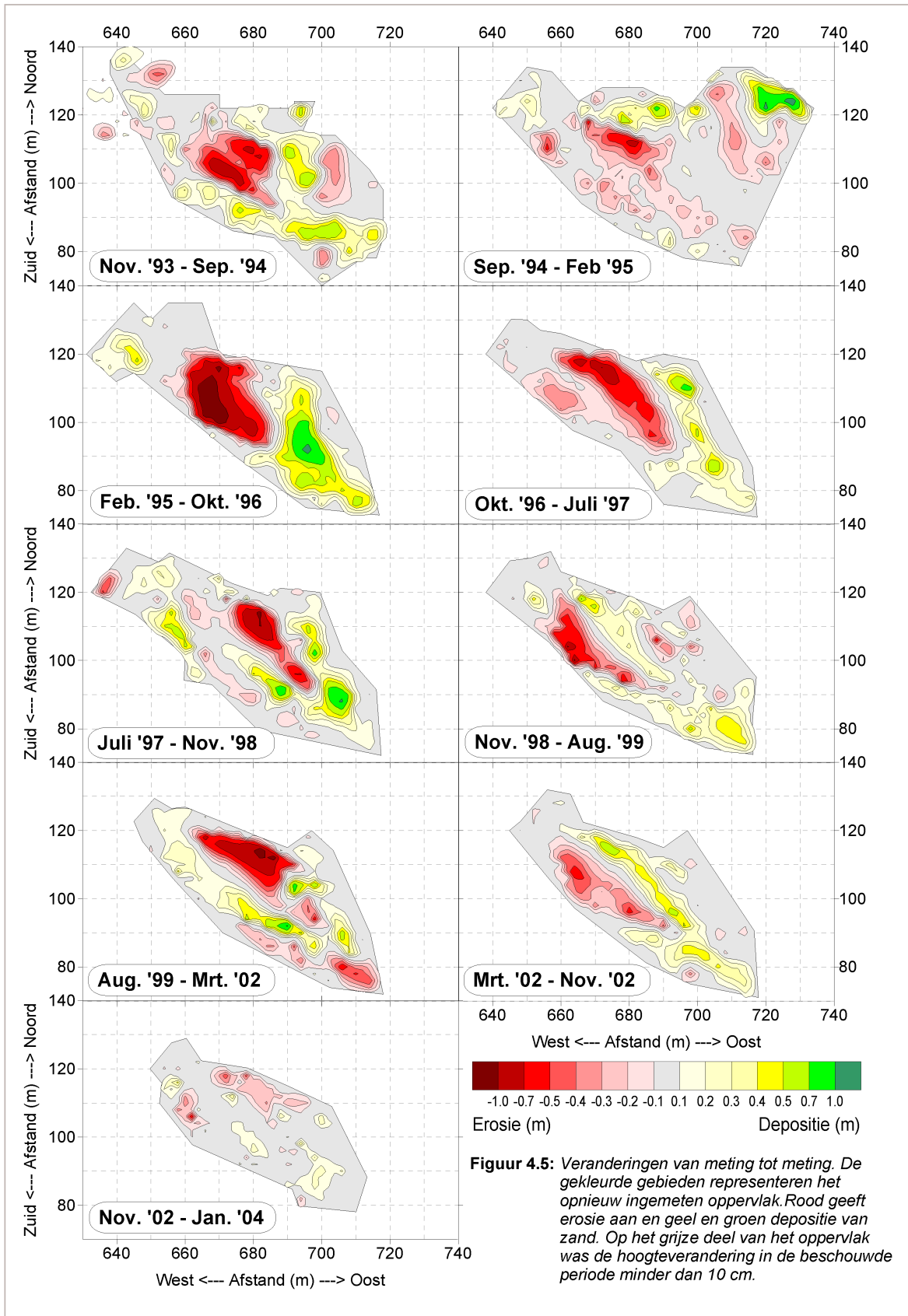
Uit de in de vorige paragraaf besproken metingen is voor iedere opname een nieuw DTM geconstrueerd (zie paragraaf 3.3). Figuur 4.3 toont enkele voorbeelden van de aldus geproduceerde DTM's.

Het oorspronkelijke terrein (januari 1993) was een golvende duinrug. In de tweede wereldoorlog was dit nog de zeereep. De hoogte van het omliggende terrein is circa 2.5m +NAP, terwijl de toppen van deze oude zeereep reiken tot ongeveer 11m +NAP.

Bij de ingreep (zie DTM november 1993) is een inkeping gemaakt met een rechte bodem op 6.3m +NAP, met schuine zijwanden onder een hoek van ca 20°. Op doorsnede had deze inkeping een V-vorm. Het weggegraven zand, circa 1100 m³, is weggelegd in een “depot”, enkele tientallen meters ten NO van de ingreep.

In de jaren na de ingreep vindt sterke erosie plaats van de zijwanden. Reeds in februari 1995 (minder dan anderhalf jaar na de ingreep) is de verstuiwing aanmerkelijk breder geworden. De V-vormige doorsnede verandert geleidelijk in een meer U-vormige doorsnede. Ook de bodem erodeert, met name in het midden van de kuil. De meeste depositie vindt plaats aan de ZO-kant van de kuil, zowel in het verlengde als op de zijwanden. Zo is de aanvankelijk onnatuurlijke vorm geëvolueerd tot een object wat de typische vorm van een stuifkuil vertoont.

In de jaren 1995-2004 verandert de kerf voortdurend. De bodem en zijwanden eroderen verder. De kerf wordt breder en dieper (zie ook paragraaf 4.4) en het duin ten zuidoosten wordt hoger. Het meeste zand wordt afgezet ten zuidoosten van de kerf en op de zijkanten van de kuil. In de volgende paragraaf wordt in meer detail besproken hoe de veranderingen van meting tot meting geweest zijn.



4.3 Verschilkaartjes

Door twee hoogtekarten van elkaar af te trekken kan worden bepaald op welke plaatsen erosie en depositie heeft plaatsgevonden in de tussenliggende periode. Figuur 4.5 bevat de verschilkaartjes voor negen deelperioden in de periode van november 1993 tot Januari 2004. Bij het beoordelen van deze kaartjes moet onder meer in ogenschouw worden genomen dat de perioden niet altijd even lang zijn. De meeste perioden zijn ongeveer een jaar lang, maar met name de periode Aug'99-Mrt'02 is erg lang (31 maanden).

In de periode Nov'93-Sep'94 is vooral het centrum van de kuil geërodeerd en de zijwanden, waardoor de kuil dieper en breder werd. Gezien de relatieve locatie van erosie- en depositiegebieden lijkt het er op dat in deze periode het zandtransport voornamelijk heeft plaatsgevonden bij NW-winden.

In de periode Sep'94-Feb'95 en (mogelijk ook daarvoor) is ook wat zand weggewaaid van het depot, omdat de helm die erop gepoot was nog niet aansloeg. Dit zand is voornamelijk afgezet op de NO-helling van het depot (coördinaten X=723,Y=122). Ook uit de kuil zelf is zand gewaaid, dat deel is afgezet op de NO-wand van de kuil en deel op de NO-helling van het depot.

In de periode Feb'95-Okt'96 heeft voornamelijk zandtransport plaatsgevonden bij NW-winden. Het centrum van de kuil is aanmerkelijk uitgediept en het zand is vooral afgezet aan de ZO-zijde van de kuil waar zich inmiddels een aardig duin begint te vormen. Blijkbaar is er ook zand getransporteerd bij oostenwinden, getuige de accumulatie aan de NW-kant van de kuil (zie ook de foto in figuur 4.4).

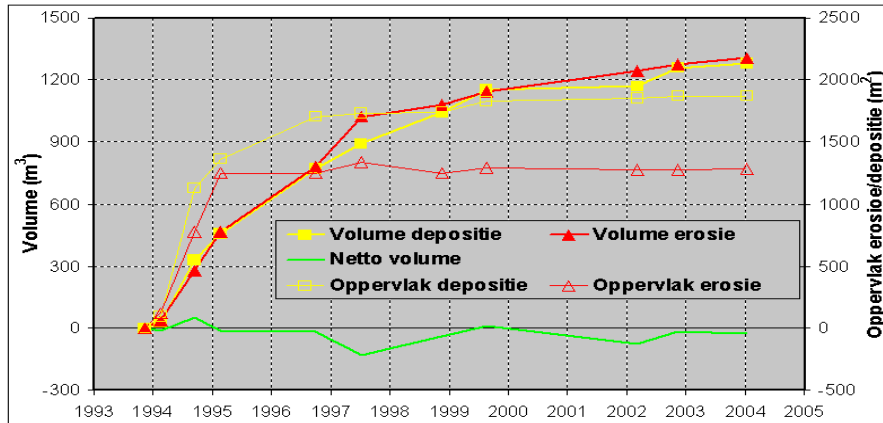
In de periode Okt'96-Juli'97 is het centrum van de kuil verder uitgediept en is vooral de NO-wand van de kuil geërodeerd. Het zand is vooral afgezet naast de kuil aan de NO-zijde en op het duin aan de ZO-zijde. Blijkbaar was de overheersende transportrichting in deze periode van west naar oost.

In Juli'97 is de kuil in het centrum inmiddels flink uitgediept en is het duin aan de ZO-zijde in hoogte toegenomen. Hoewel de bodem aanvankelijk vlak was op 6.3 m +NAP, is in 1997 het hoogteverschil tussen het centrum van de kuil en het duin gegroeid tot circa drie meter. Na 1997 is de kuil zo diep dat de wind vanuit de meeste richtingen niet veel vat meer heeft op de kuil. Alleen de NW-wind kan nog vrij binnentreden. Vaak zien we dat zand tijdelijk wordt afzet binnen de kuil om later tijdens een iets andere windrichting weer te worden opgeruimd. Netto verdwijnt er echter nog steeds zand uit de kuil en wordt het duin nog hoger. In 2004 is het hoogteverschil tussen het centrum van de kuil en het duin aan de lijkzijde gegroeid tot 4.5 m.

In de periode Mrt'02-Nov'02 is er niet veel zand verplaatst, maar dat is niet verwonderlijk, omdat dit een relatief korte periode was (8 maanden) en bovendien een zomerperiode. In de periode Nov'02-Jan'04 werd er erg weinig zand verplaatst, waarschijnlijk omdat het in die periode niet vaak genoeg hard gewaaid heeft (hierover later meer).

4.4 Volumeberekeningen

Uit de verschilkaartjes zoals getoond in figuur 4.5 is berekend wat het totale volume is van de hoeveelheid geërodeerd zand (negatieve verschillen) en het volume van de hoeveelheid zand die geaccumuleerd is (positieve verschillen). Ook is berekend over welk oppervlak de erosie, dan wel accumulatie meer dan 10 cm bedroeg. Dit is gedaan van opname tot opname, maar ook zijn de verschillen berekend tussen iedere opname en de begintoestand, direct na het



Figuur 4.6: Erosie en depositie sinds november 1993. De oppervlakken zijn de oppervlakken waarop de hoogteverandering sinds nov.'93 meer dan 10 cm bedroeg.

aanbrengen van de kerf (november 1993). Figuur 4.6 toont de volumes erosie en depositie sinds november 1993 en het oppervlak waarover de erosie of depositie meet dan 10 cm bedroeg.

In figuur 4.6 is te zien dat het totale volume aan erosie dan wel depositie na 1993 snel toeneemt, om in latere jaren enigszins af te vlakken. Dit komt onder meer omdat naar het einde van de meetperiode steeds vaker zand binnen de kuil heen en weer verplaatst wordt, zodat er netto niet veel verandert. Het netto volume (depositie min erosie) blijft nagenoeg constant. Hetgeen er op lijkt te wijzen dat er vrij weinig zand verdwijnt naar buiten het gebied dat gemonitord werd. Volumetoenames zouden verklaard kunnen worden doordat zand na transport minder compact wordt gedeponeed dan het oorspronkelijk lag. Een afname in het netto volume kan doordat het door de wind vrij los gedeponeede zand in de loop van de tijd inklinkt of doordat er zand wegwaait uit het gebied dat wordt gedekt door de monitoring. Uiteraard kunnen meetfouten ook een rol spelen. Het is onwaarschijnlijk dat er zand het gebied ingewaaid is vanuit de omgeving, daar de omgeving goed begroeid is.

Het oppervlak waarover de erosie sinds november 1993 meer dan 10 cm bedraagt neemt aanvankelijk snel toe, maar is sinds februari 1995 vrijwel constant. Het oppervlak waarover de accumulatie van zand meer dan 10 cm bedraagt neem nog langer toe.

In de volgende paragraaf worden de volumeveranderingen van opname tot opname vergeleken met een index voor het eroderend vermogen van de wind.

4.5 “Windpower” en zandverplaatsing

In paragraaf 4.3 werd geconstateerd dat in de laatste twee perioden nog slechts weinig zand werd verplaatst. Mogelijk zou dit veroorzaakt kunnen zijn doordat het in die perioden niet vaak genoeg hard heeft gewaaid. Ook wordt in die paragraaf enkele malen gespeculeerd over de richting waarin het meeste zand wordt verplaatst. Deze zaken kunnen beter onderbouwd worden door een analyse van de opgetreden windsnelheden in de meetperioden.

Theoretisch zou de transportcapaciteit van de wind ongeveer evenredig moeten zijn met de derde macht van het verschil tussen de windsnelheid en de drempelwaarde waarbij het zandtransport begint (zie bijv. Bagnold 1941, Kawamura 1964, Lettau en Lettau 1977, White 1979, Sherman et al. 1998). Daarom is een windpower-index berekend voor de totale

transportcapaciteit in de beschouwde meetperiode volgens (vergelijkbaar met Pluis & Van Boxel 1993):

$$WP = \frac{a}{N} \times \sum_{t=t_{\text{begin}}}^{t_{\text{eind}}} \max(0, [U - U_t]^3) \quad (4.1),$$

Waarin U de uurgemiddelde windsnelheid is, U_t de drempelwaarde waarbij het zandtransport begint, en a een evenredigheidsconstante en N het aantal maanden dat de betreffende meetperiode besloeg. De sommatie werd uitgevoerd van het eerste (t_{begin}) t/m het laatste (t_{eind}) uur van de meetperiode en bij windsnelheden kleiner dan de drempelwaarde werd achter het sommatieteken nul ingevuld. Niet alle meetperiodes waren even lang. Door te delen door het aantal maanden wordt een gemiddelde windpower per maand verkregen, waardoor de verschillende meetperiodes beter vergelijkbaar worden. Omdat het doel hier een onderlinge vergelijking is van de verschillende meetperiodes kan de evenredigheidsconstante a willekeurig gekozen worden; hier is gekozen voor $a=0.012$.

Voor het berekenen van de windpower-index is gebruik gemaakt van de uurlijkse windgegevens van het KNMI-station Hoorn Terschelling. Hoorn ligt midden op het eiland Terschelling, zodat de ZW-wind en de NW-wind ongeveer in gelijke mate worden afgeremd door het eiland. Dit is een verschil met de locatie Rietpad op Ameland, die aan de noordkant van het eiland ligt, waarbij de NW-winden vrijwel direct van zee komen en de ZW-winden over het eiland aankomen. Dit is een punt om bij de interpretatie van de gegevens in het oog te houden.

Van (mm/jj)	Tot (mm/jj)	Erosie (m ³)	Depositie (m ³)	Maanden	Erosie (m ³ /mnd)	Depositie (m ³ /mnd)	Gemidd. (m ³ /mnd)	Windpower (m ³ /s ³ /mnd)
11/93	09/94	277	329	10.0	27.7	32.9	30.3	19.6
09/94	02/95	299	237	5.0	59.8	47.4	53.6	24.7
02/95	10/96	361	357	19.2	18.8	18.6	18.7	10.5
10/96	07/97	282	166	9.2	30.6	18.0	24.3	16.5
07/97	11/98	204	301	16.4	12.4	18.3	15.4	14.6
11/98	08/99	172	216	8.9	19.3	24.3	21.8	13.5
08/99	03/02	277	192	30.8	9.0	6.2	7.6	18.9
03/02	11/02	144	204	8.0	18.0	25.4	21.7	6.4
11/02	01/04	77	65	14.1	5.5	4.6	5.0	0.9

Tabel 4.1: Volume aan erosie en depositie en de windpowerindex voor de verschillende meetperiodes. De kolom "Gemidd" geeft het gemiddelde van de erosie en de depositie per maand.

Tabel 4.1 geeft de erosie en depositie voor de verschillende meetperiodes, zowel in absolute waarden (m³) als in gemiddelden per maand (m³/mnd) en de volgens vergelijking 4.1 berekende waarde van de windpower-index (deze is tevens genormaliseerd per maand). De hoogste waarde voor de windpower komt inderdaad overeen met de hoogste gemiddelde zandverplaatsing per maand (periode Sep'94-Feb'95) en het minste zand wordt verplaatst in de periode dat de windpower-index het laagst is (Nov'02-Jan'04).

De correlatie (R^2) tussen de gemiddelde zandverplaatsing en de windpower-index bedraagt 0.45, wat wil zeggen dat, statistisch gezien, 45% van de variantie in de zandverplaatsing kan worden verklaard uit variaties in de windpower-index. Als de totale zandverplaatsing wordt vergeleken met de windpower-index per windrichting blijkt de correlatie tussen

zandverplaatsing en de bijdrage van NW-winden aan de windpower-index het grootst (zie tabel 4.3).

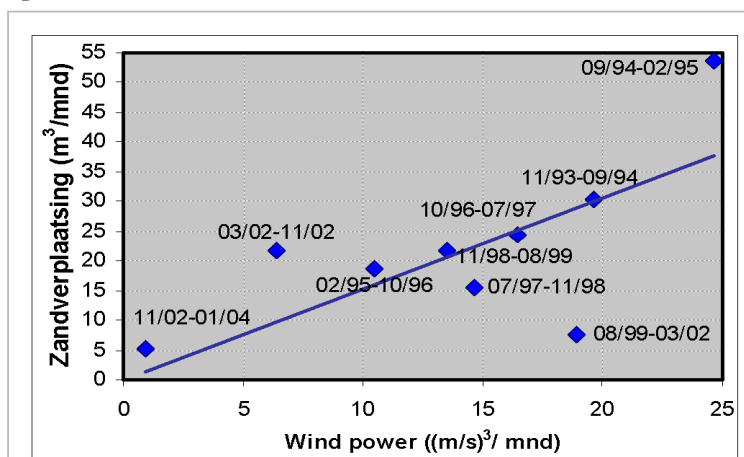
Windrichting	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW	Alle
Correlatie	0.76	0.00	0.07	0.19	0.36	0.15	0.40	0.79	0.45

Tabel 4.3: Correlatie (R^2) tussen zandverplaatsing en de windpower-index per windrichting.

In figuur 4.7 is de relatie tussen de gemiddelde zandverplaatsing en de windpower-index nog eens grafisch weergegeven. De meeste punten liggen dicht bij de weergegeven regressielijn.

Voor de periode Aug'99-Mrt'02 is de waargenomen zandverplaatsing veel lager dan hetgeen door de regressielijn wordt voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door drie effecten.

- Ten eerste waren in deze periode de winden die eventueel zand konden verplaatsen veelal zuidwest (zie ook figuur 4.8). Bij ZW-winden zal de wind bij het Rietpad op Ameland waarschijnlijk minder krachtig waaien dan bij Hoorn op Terschelling, omdat de wind een langere weg over het eiland moet afleggen. De windpower-index berekend op grond van de windsnelheid van het KNMI-station Hoorn Terschelling zal dus bij ZW-wind een overschatting geven van de eroderende werking van de wind.



Figuur 4.7: Zandverplaatsing per meetperiode uitgezet tegen de berekende windpower-index.

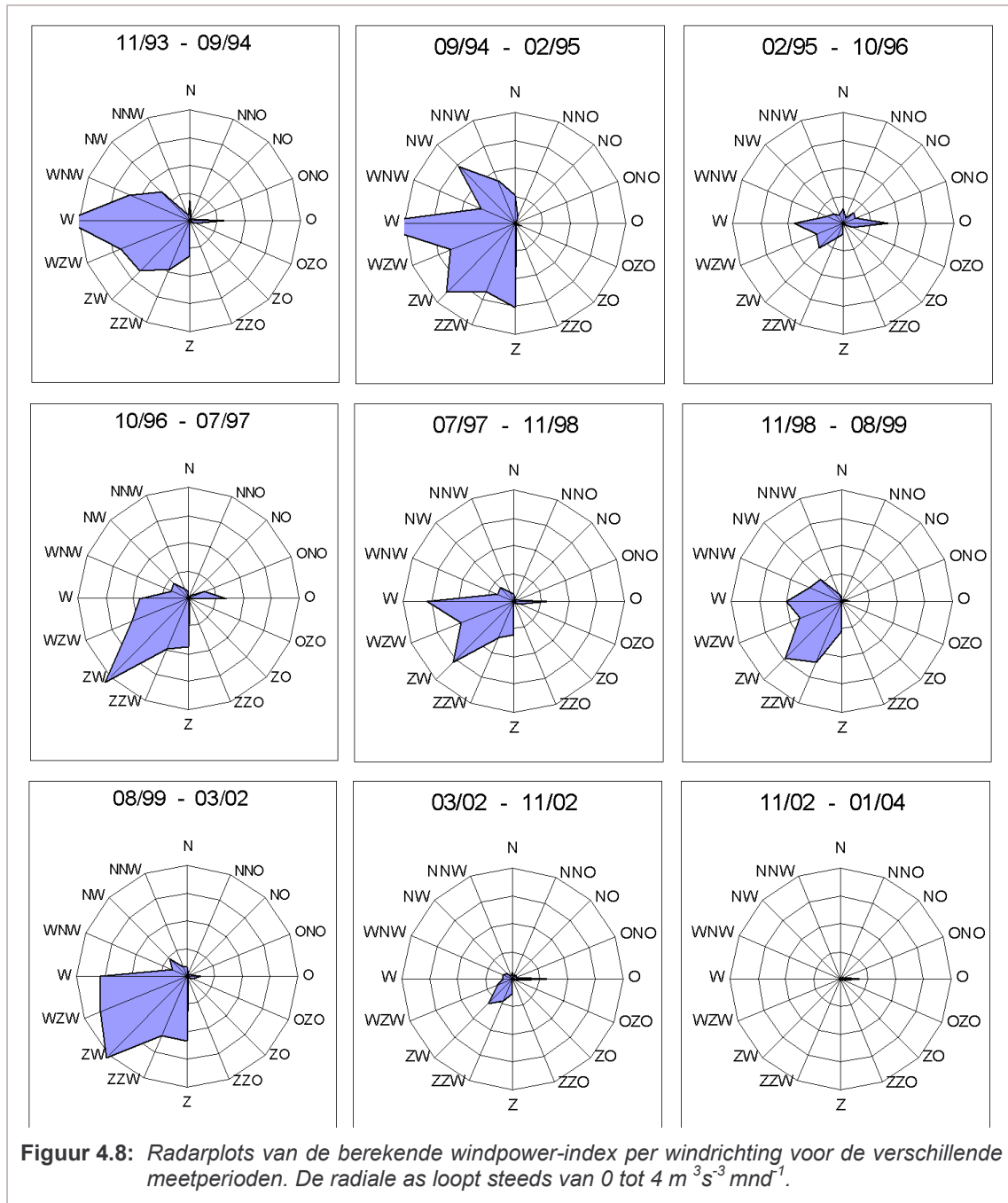
- Ten tweede hebben kunnen de ZW-winden door de vorm en oriëntatie van de kuil minder grip op de kuil.

- Ten derde betreft het hier de langste periode (31 maanden). In zo'n lange periode kan zand van de ene kant van de kuil naar de andere kant worden verplaatst en (deels) weer terug. De totaal gemeten erosie of depositie is daardoor minder dan wanneer de erosie of depositie gemeten over enkele kortere perioden wordt opgeteld.

De twee punten die duidelijk boven de regressielijn liggen (perioden Sep'94-Feb'95 en Mrt'02-Nov'02) zijn ook de twee kortste perioden waarin de minste kans is dat het zand meerdere malen wordt verplaatst. In de periode Sep'94-Feb'95 was er bovendien een aanzienlijke bijdrage van de NW-winden aan de windpower-index (zie figuur 4.8), zodat het niet verwonderlijk is dat in deze periode op maandbasis het meeste zand werd verplaatst.

In figuur 4.8 voor alle meetperioden de windpower-index, berekend op grond van de windmetingen op het KNMI-station Hoorn Terschelling, geploteerd als functie van de windrichting. In deze figuur is te zien dat de eroderende werking van de wind van meetperiode tot meetperiode sterk verschilt, zowel in totale hoeveelheid als in de verdeling over de windrichtingen. Duidelijk is ook dat de eroderende winden over het algemeen uit het westen komen, waarbij opgemerkt moet worden dat de metingen bij Hoorn Terschelling waarschijnlijk de windpower-index voor de locatie Rietpad overschat bij ZW-wind en onderschat bij NW-wind.

Gedurende de eerste twee meetperioden is de erosieve kracht van de wind aanzienlijk. Inderdaad is er, zoals reeds opgemerkt in paragraaf 4.3, in de periode Sep'94-Feb'95 ook een aanzienlijke bijdrage van ZW-winden, die er toe leiden dat een deel van het depot in de NO-richting werd verplaatst. Ook de bijdrage van oostenwinden aan de zandverplaatsing in de periode Feb'95-Okt'96, die al gevonden was in de verschilkaartjes in figuur 4.5 is duidelijk te zien. Opmerkelijk is ook de zeer geringe erosieve kracht van de wind in de laatste twee meetperioden.



5. DISCUSSIE

De belangrijkste doelstellingen van het verstuivingsproject bij het Rietpad op Ameland waren om te onderzoeken of een kunstmatig gecreëerde verstuiving zonder verdere bemoeienis in verstuiving kon blijven en of een verstuiving in een zeereep kan leiden tot de vorming van een paraboolduin. Verder werd onderzocht of een kerf in een zeereep zou leiden tot een doorbraak en of het zand ver landinwaarts waait, dan wel dicht bij de kerf blijft. Om veiligheidsredenen was het experimenteren met een verstuiving in de huidige zeereep niet mogelijk. Vandaar dat gekozen is voor een ingreep in een fossiele zeereep, enkele honderden meters achter de huidige zeereep.

Bij de aangebrachte kerf in de fossiele zeereep is gekozen voor een NW-ZO oriëntatie. Omdat de meeste eroderende winden uit het westen komen en op de Waddeneilanden (m.u.v. Texel) de duinenkust aan de noordkant van het eiland ligt. De ZW-winden zijn daar al geremd omdat ze aankomen over het eiland, terwijl de NW-winden vrijwel direct van zee komen. Dat dit een goede keuze was lijkt te worden bevestigd door de hoge correlatie tussen het gemeten zandtransport en de bijdrage van de NW-winden (en N-winden) aan de windpower-index. De correlatie tussen harde winden uit het ZW en de verplaatsing van zand daarentegen is gering, ondanks het frequent voorkomen van ZW-winden. Deels wordt de hoge correlatie tussen zandverplaatsing en harde winden uit het NW echter ook veroorzaakt door de oriëntatie van de ingreep op het NW. Metingen van student Andy Baas (Baas 1994, Van Boxel & Jungerius 1997) lieten bijv. zien dat bij NW-wind de windsnelheid van het begin van de kuil naar het einde toe met bijna een factor twee toenam. Al met al lijkt de oriëntatie van de kuil op de NW-wind een goede keuze.

Na de ingreep is het verstuivingsproject meer dan tien jaar gevolgd via geregelde waterpassingen, met meestal een tussentijd van ongeveer een jaar. Deze waterpassingen voldeden goed om de ontwikkeling van de verstuiving te volgen. Het volume geërodeerd zand was niet altijd gelijk aan het volume van de accumulatie. Daarvoor waren de volgende redenen aan te voeren: de geringere compactie van de accumulatie t.o.v. het geërodeerde zand, het inklinken van de accumulatie in de loop van de tijd en het wegwaaien van zand uit het gemonitorde gebied. Er waren echter geen aanwijzingen voor ernstige systematische fouten en er werd geconcludeerd dat de kwaliteit van de metingen voldoende was.

De netto erosie/accumulatie (Figuur 4.6) is op lange termijn vrijwel nul. Dit is een aanwijzing dat nauwelijks zand uit het systeem verdwijnt. Dit wordt ondersteund, door de veldwaarnemingen, waarbij op afstanden van meer dan 10 m van de ingreep nog nauwelijks vers zand werd aangetroffen. Deze waarnemingen wijzen erop dat het meeste zand zeer dicht bij de kuil blijft en dat er slechts verwaarloosbare hoeveelheden over grotere afstanden worden getransporteerd. Ook andere onderzoeken laten zien dat het meeste zand dicht bij een stuifkuil wordt afgezet (bijv. Van der Meulen et al. 1996, Van Boxel et al. 1997, Arens 2004).

In vrijwel iedere meetperiode worden aanzienlijk hoeveelheden zand verplaatst (zie figuur 4.5). Zelfs in de periode Mrt'02-Nov'02, waarin de windsnelheden niet erg groot zijn, wordt toch per maand ongeveer 22 m³ zand verplaatst. Alleen in de laatste periode Nov'02-Jan'04 werd weinig zand verplaatst, maar dat is niet verwonderlijk gezien het feit dat er in die periode nauwelijks windsnelheden voorkwamen die hoog genoeg waren om zand te kunnen verplaatsen. Een analyse van de windgegevens van De Kooij nabij Den Helder (niet opgenomen in het rapport) gaf ook voor die laatste periode de laagste windpower-index. Deze resultaten laten zien dat een

kunstmatig gecreëerde verstuiving, zonder verdere ingrepen, meer dan tien jaar actief kan blijven, mits de locatie zorgvuldig wordt gekozen.

Een lange periode met weinig wind, zoals gedurende de laatste twee meetperioden (Mrt'02-Nov'02 en Nov'02-Jan'04) zou er wel eens toe kunnen leiden dat planten meer kans hebben zich te vestigen en zo de verstuiving te stoppen. De foto op de omslag laat echter zien dat de verstuiving nog volop actief is, hetgeen ook werd vastgesteld tijdens een veldbezoek in juni 2004. Alles lijkt erop te wijzen dat de verstuiving nog wel een aantal jaren actief kan blijven. De steeds hoger wordende begroeiing ten NW van de locatie zou op den duur wel een belemmering kunnen vormen voor de verstuiving, omdat deze begroeiing naarmate ze hoger wordt meer en meer de wind afzwakt.

Het bleek goed mogelijk de hoeveelheid verplaatst zand en de richting waarin de verplaatsing plaatsvond te verklaren uit de opgetreden windsnelheden en windrichtingen. Hierbij moet wel goed rekening worden gehouden met de lengte van de meetperiode. Naarmate de meetperiode langer is, wordt de kans groter dat zand op één plaats in de kuil wordt weggelegd en later weer erodeert. Netto wordt dan op die plek geen erosie of accumulatie geregistreerd. De lange perioden lagen dan ook aanzienlijk onder de opgestelde regressielijn, terwijl de korte perioden er duidelijk boven lagen. Dit laatste geldt zelfs voor de relatief windarme periode van maart 2002 tot november 2002.

De verstuiving was aangelegd als een lange kerf in het duin met een rechte bodem op 6.3 m +NAP. In de loop der jaren is de kuil steeds dieper en breder geworden. Het meeste zand werd daarbij aan de zuidoost zijde gedeponneerd. In 2004 bevond het diepste punt zich op 4.3 m +NAP (een uitdieping van 2.0m) en reikte het duin aan de ZO-zijde tot 8.8 m hoogte (2.5 m accumulatie).

De ontstane verstuiving heeft eerder de typische ellipsvorm van een stuifkuil dan de vorm van een paraboolduin. De vorm van het duin aan de ZO-zijde is wel min of meer paraboolvormig, maar de typische vlakke uitstuiwingsvallei, die je bij een paraboolduin aan de windwaartse zijde vindt, ontbreekt. Mogelijk is er voor de vorming van een paraboolduin toch meer tijd nodig. Als de kuil nog breder en dieper wordt zal uiteindelijk het grondwater bereikt worden, zodat er dan wel een vlakke bodem kan ontstaan. Bij een locatie in een actieve zeereep, in plaats van in een fossiele zeereep enkele honderden meters landinwaarts zouden de NW-winden nog meer grip hebben op de kuil en zouden de processen sneller verlopen. Een stuifkuil in een 20 m hoge actieve zeereep bij Wassenaar werd in tweeënehalf jaar ruim 5 m dieper (Arens 2004), maar werd in de jaren daarna niet veel dieper meer, waarschijnlijk ondermeer doordat de wind werd vertraagd door het zand dat zich ophoopte aan de lijzijde van de kuil.

Voor het ontstaan van een echt paraboolduin van voldoende afmetingen is waarschijnlijk ook meer zand nodig dan beschikbaar was in de fossiele zeereep waarin de ingreep is uitgevoerd.

Het laten ontstaan van een paraboolduin uit een kunstmatig gecreëerde verstuiving is waarschijnlijk wel mogelijk wanneer die wordt uitgevoerd in een actieve zeereep van naar schatting circa 15 m hoog. Zelfs in dat geval gaat er waarschijnlijk wel 10 à 20 jaar overheen voordat een vorm ontstaat die kan worden gekenmerkt als een paraboolduin.

6. CONCLUSIES

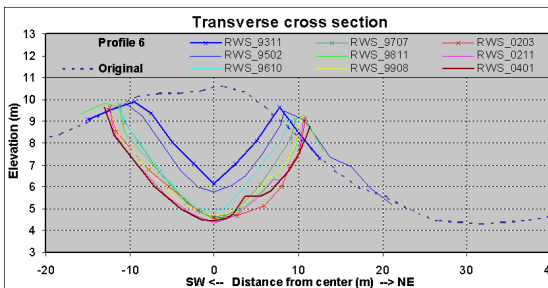
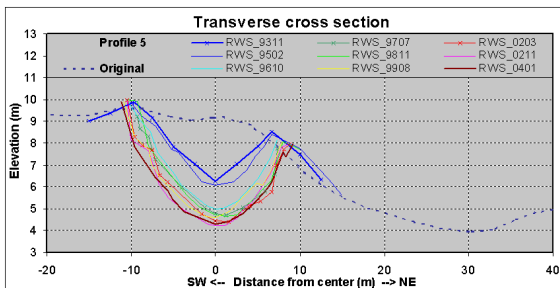
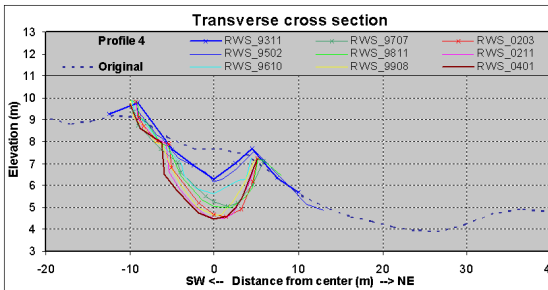
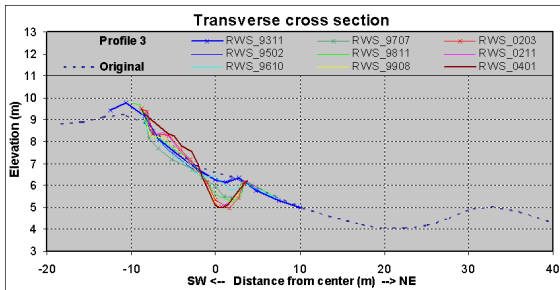
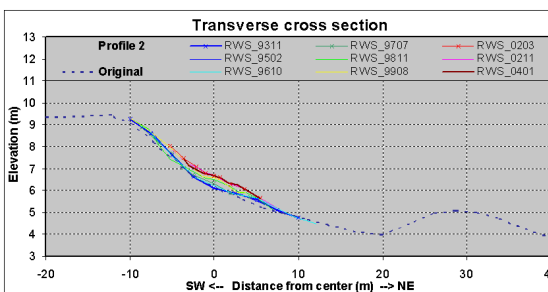
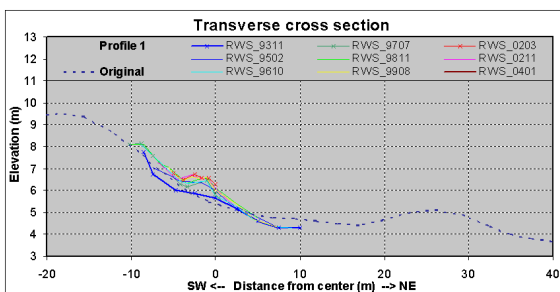
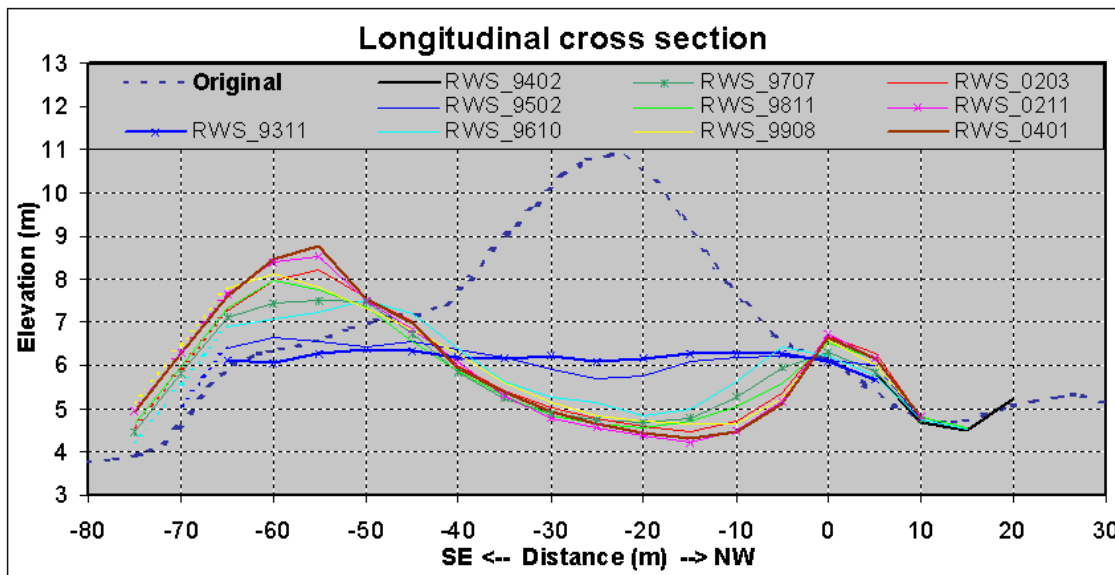
- De oriëntatie van de verstuiwing op de noordwesten wind was een goede keuze.
- De waterpassingen voldeden als methode om de ontwikkeling van de verstuiwingen te volgen.
- Verreweg het meeste zand dat erodeert, wordt weer zeer dicht bij de kuil weggelegd. De hoeveelheid zand die ver landinwaarts waait is te verwaarlozen.
- In het uitgevoerde experiment leidde een kerf in een (fossiele) zeereep niet tot een doorbraak, omdat de accumulatie benedenwinds de vorming van een nieuwe rug veroorzaakte.
- Als in een fossiele of actieve zeereep een kerf of stuifkuil ontstaat wordt er weliswaar zand verplaatst, maar het zand blijft in het profiel aanwezig, zodat de veiligheidsrisico's beperkt zijn.
- Het was goed mogelijk de hoeveelheid zandverplaatsing en de richting te verklaren aan de hand van de opgetreden windsnelheden en windrichtingen.
- Een kunstmatig gecreëerde verstuiwing kan tien jaar of langer actief blijven, zonder verdere ingrepen, mits de locatie goed gekozen is.
- De verstuiwing heeft zich (nog?) niet ontwikkeld tot een paraboolduin, doch eerder tot een fikse stuifkuil.
- Voor de ontwikkeling van een paraboolduin op deze plaats moet de verstuiwing waarschijnlijk nog tientallen jaren actief blijven.
- Het laten ontstaan van een kunstmatig gecreëerd paraboolduin is waarschijnlijk wel mogelijk als de ingreep wordt uitgevoerd in een actieve zeereep van circa 15 m hoog. Zelfs in dat geval gaat er waarschijnlijk wel minimaal 10 à 20 jaar overheen voordat er een vorm ontstaat die kan worden gekenmerkt als paraboolduin.

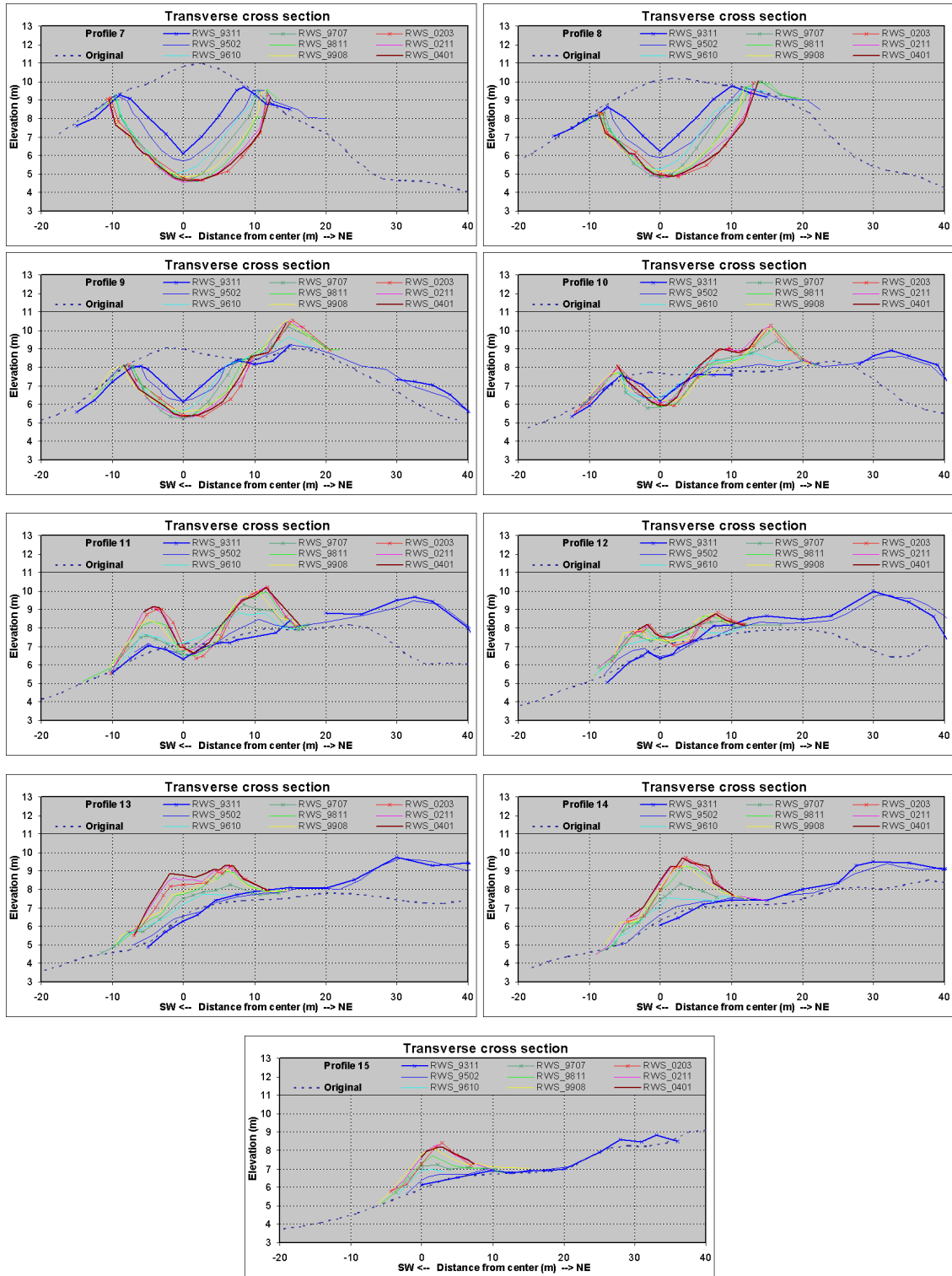
7. LITERATUURVERWIJZINGEN

- Arens, S.M., 2003.** Monitoring van een gereactiveerd paraboolduin, Kraansvlak, Zuid-Kennemerland; ontwikkeling 2002-2003. RAP2003.05 in opdracht van nv PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland.
- Arens, S.M., 2004.** De stuifkuil bij Wassenaar; hoogte metingen 2004. Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, 10 pp.
- Arens, S.M., P.D. Jungerius & J.H. van Boxel, 1997.** Duurzame verstuiving in de Schoorlse duinen; een inventarisatie van potentiële lokaties. Rapport Vakgroep Fysische Geografisch en Bodemkundig & Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, Universiteit van Amsterdam, 23 pp.
- Arens, S. M., M. Witteveldt & F. Erinkveld, 2001.** Duurzame verstuiving in de Schoorlse Duinen. Monitoring van gereactiveerde stuifkuilen in 2001. Amsterdam, Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2001.04, 23 pp.
- Arens, S.M., Q. Slings & C.N. de Vries, 2004.** Mobility of a remobilised parabolic dune in Kennemerland, The Netherlands. *Geomorphology* 59: 175-188.
- Bagnold, R.A., 1941.** The Physics of blown sand and desert dunes. Chapman and Hall, London, New York.
- Boxel, J.H. van & P.D. Jungerius, 1992.** Ameland, verstuivingslokatie. Rapport Vakgroep Fysische Geografisch en Bodemkundig, Universiteit van Amsterdam, 8 pp.
- Boxel, J.H. van & P.D. Jungerius, 1993.** Ameland, verstuivingslokatie RP3. Rapport Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 10 pp.
- Boxel, J.H. van & P.D. Jungerius, 1994.** Duinen mogen weer stuiven; terug naar de blanke top. *Waddenbulletin* 29: 88-92.
- Boxel, J.H. van & P.D. Jungerius, 1996.** Experiment parabolisering van een fossiele zeereep. Rapport Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 25 pp.
- Boxel, J.H. van & P.D. Jungerius, 1997.** Parabolisering op Ameland; Voortgangsrapport 1997. Rapport Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 15 pp.
- Boxel, J.H. van, P.D. Jungerius, N. Kieffer & N. Hampele, 1997.** Ecological effects of reactivation of artificially stabilized blowouts in coastal dunes. *Journal of Coastal Conservation* 3: 57-62.
- Kawamura, R., 1964.** Study of sand movement by wind. Hydraulic Engineering Laboratory Technical Report HEL-2-8, 99-108. Berkeley University California.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W) 1990.** Kustverdediging na 1990, beleidskeuze voor de kustlijnverzorging. Min. V&W, Rijkswaterstaat, 183 pp.
- Lettau, K., Lettau, H., 1977.** Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. In: K. Lettau & H. Lettau (Eds.), *Exploring the worlds driest climate*, I.E.S. Report 101, University of Wisconsin Press, Madison, 110-147.

- Kooijman A.M., J.C.R. Dopheide, J. Sevink, I. Takken & J.M. Verstraten, 1998.** Nutrient limitations and their implications on the effects of atmospheric deposition in the coastal dunes; lime-poor and lime-rich sites in the Netherlands. *Journal of Ecology* 86: 511-526.
- Meulen, F. van der, A.M. Kooijman, M.A.C. Veer & J.H. van Boxel, 1996.** Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiëring in open droge duinen; Eindrapport Fase 1, 1991-1995. Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 232pp.
- Meulen, F. van der, A.M. Kooijman, M.A.C. Veer & J.H. van Boxel, 1998.** Duinen op winst of verlies? Vijf jaar effectgerichte maatregelen in droge duinen. In: E. Bobbink, J.G.M. Roelofs & H.B.M. Tomassen (eds.) Effectgerichte maatregelen en behoud van biodiversiteit in Nederland. Katholieke Universiteit Nijmegen, pp 113-130.
- Pluis, J.L.A. & J.H. van Boxel 1993.** Wind velocity and algal crusts in dune blowouts. *Catena* 20: 581-594.
- Pottjegort, J, J. Vrugt & R. Wilms, 1996.** Dynamiek van een stuifkuil, een geostatistische analyse. Studentenverslag Vakgroep Fysische Geografisch en Bodemkundig, Universiteit van Amsterdam.
- Sherman, D.J., Jackson, D.W.T., Namikas, S.L., Wang, J., 1998.** "Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models. *Geomorphology*, 22, 113-133.
- Veer, M.A.C., 1998.** Effects of grass-encroachment and management measures on vegetation and soil of coastal dry dune grasslands. Proefschrift Universiteit van Amsterdam, 124 pp.
- White, B.R., 1979.** Soil transport by wind on Mars. *Journal of Geophysical Research* 84: 4643-4651.

BIJLAGE 1: HOOGTEMETINGEN LANGS DE RAAIEN





BIJLAGE 2: OVERZICHT GEBRUIKTE FILENAMEN BIJ MAKEN NIEUWE DTM'S

Datum	Omtrek van het opnieuw ingemeten gebied	Nieuwe punten	Oud raster, aangevuld met nieuwe punten	Nieuwe gridfiles
Voor aanvang		RietOrig.dat	9301-XYZ.xls	9301-new.grd
November 1993	9311-omtrek.blm	9311-RWS.xls	9311-XYZ.xls	9311-new.grd
Februari 1994	9402-omtrek.blm	9402-RWS.xls	9402-XYZ.xls	9402-new.grd
September 1994	9409-omtrek.blm	9409-RWS.xls	9409-XYZ.xls	9409-new.grd
Februari 1995	9502-omtrek.blm	9502-RWS.xls	9502-XYZ.xls	9502-new.grd
Oktober 1996	9610-omtrek.blm	9610-RWS.xls	9610-XYZ.xls	9610-new.grd
Juli 1997	9707-omtrek.blm	9707-RWS.xls	9707-XYZ.xls	9707-new.grd
November 1998	9811-omtrek.blm	9811-RWS.xls	9811-XYZ.xls	9811-new.grd
Augustus 1999	9908-omtrek.blm	9908-RWS.xls	9908-XYZ.xls	9908-new.grd
Februari 2002	0203-omtrek.blm	0203-RWS.xls	0203-XYZ.xls	0203-new.grd
November 2002	0211-omtrek.blm	0211-RWS.xls	0211-XYZ.xls	0211-new.grd
Januari 2004	0401-omtrek.blm	0401-RWS.xls	0401-XYZ.xls	0401-new.grd