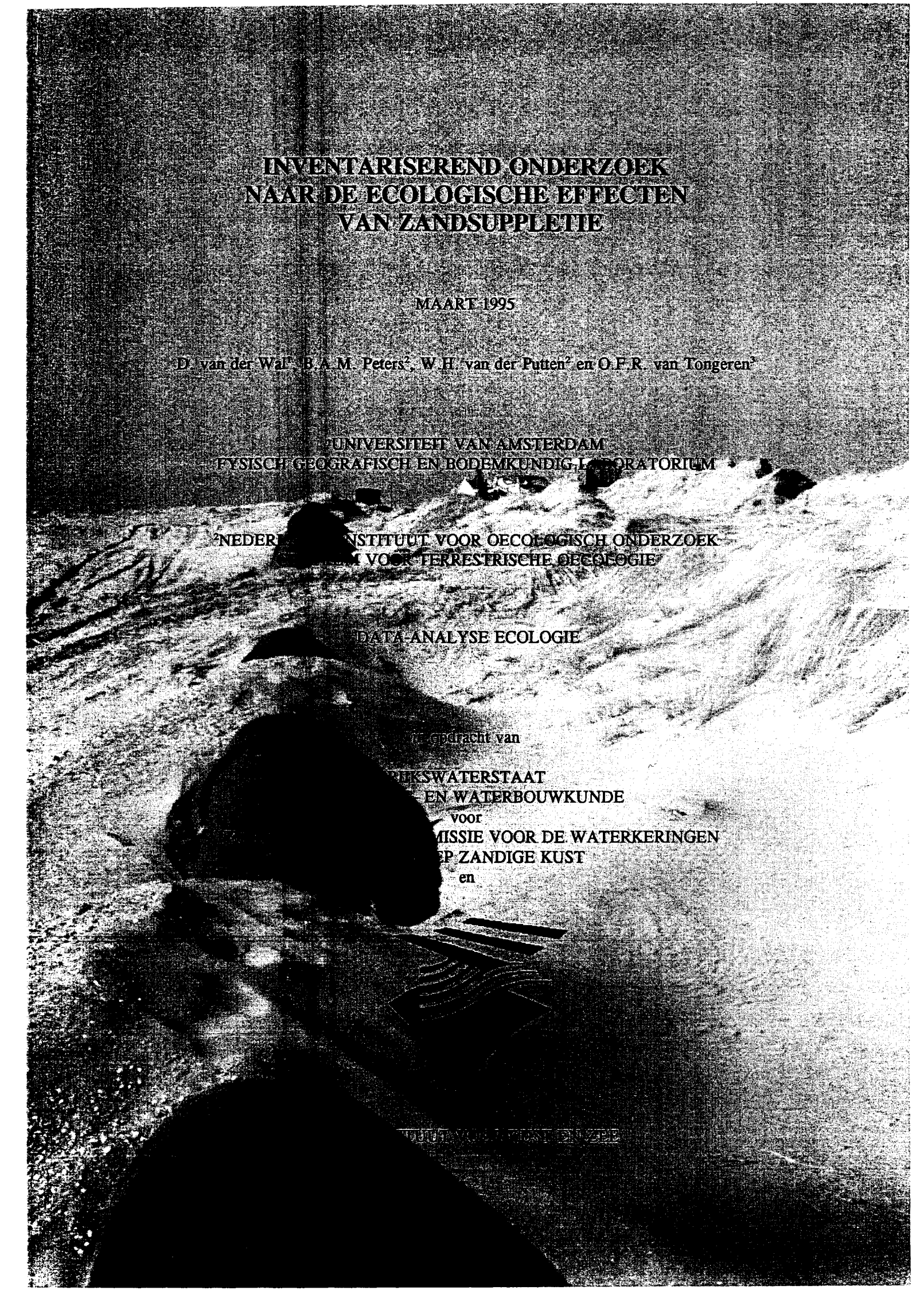




INVENTARISEREND ONDERZOEK NAAR DE ECOLOGISCHE EFFECTEN VAN ZANDSUPPLETIE

MAART 1995

D. van der Wal¹, B.A.M. Peters², W.H. van der Putten² en O.F.R. van Tongeren³

¹UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM
FYSISCH GEOGRAFISCH EN BODEMKUNDIG LABORATORIUM

²NEDERLANDS INSTITUUT VOOR OECOLOGISCH ONDERZOEK
EN VOOR TERRESTRISCHE OECOLOGIE

³DATA-ANALYSE ECOLOGIE

in opdracht van

RIJKSWATERSTAAT
EN WATERBOUWKUNDE

voor

COMMISSIE VOOR DE WATERKERINGEN
OP ZANDIGE KUST

en

INSTITUUT VOOR RIJST EN ZEE

1. Rapport nr. TAW CC 95.03	2. Serie nr.	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Inventariserend onderzoek naar de ecologische effecten van zandsuppletie		5. Datum rapport juli 1995	
		6. Code uitvoerende organisatie	
7. Schrijvers D. van der Wal B.A.M. Peters W.H. van der Putten O.F.R. van Tongeren			
8. Naam en adres opdrachtnemer Universiteit van Amsterdam, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium Nieuwe Prinsengracht 130, 1018 VZ Amsterdam Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Centrum voor Terrestrische Oecologie Postbus 40, 6666 ZG Heteren		9. Projectnaam TAWC*NATDUIN	
		10. Contract nummer DWW-857 en DWW-858	
11. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde voor de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Werkgroep Zandige Kust Postbus 5044, 2600 GA Delft Rijksinstituut voor Kust en Zee Postbus 20907; 2500 EX Den Haag		12. Nr. rapport uitvoerende org. NIOO 2022	
		13. Code andere opdrachtgever	
14. Contactpersoon opdrachtgever M. Löffler en J. de Ruig	15. Telefoonnummer opdrachtgever 015-699455 en 070-31143111	16. Type rapport eindrapportage	
17. Opmerkingen			
18. Referaat Dit rapport behandelt een inventariserend onderzoek naar de effecten van zandsuppletie op de verstui- ving van zand en op de vegetatie van de zeereep (helmvitaliteit en soortensamenstelling)			
19. Trefwoorden Zandsuppletie, verstuiving, vegetatie		20. Distributie systeem	
21. Classificatie	22. Classificatie deze pagina	23. Aant.blz. 115	24. Prijs -

WOORD VOORAF

Het onderhavige rapport behandelt een inventariserend onderzoek naar de ecologische effecten van zandsuppletie, dat vanaf juni 1994 tot en met maart 1995 is uitgevoerd. Het project bestaat uit twee delen: een studie naar de stuifgevoeligheid en het stuifgedrag van zandsuppletiezand en een onderzoek naar de helmvitaliteit en soortensamenstelling van zeeuerende duinen langs gesuppleerde kustgedeelten.

Het geomorfologisch onderzoek staat onder leiding van prof.dr. P.D. Jungerius en dr. S.M. Arens en is uitgevoerd door drs. D. van der Wal, allen van de Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde van de Universiteit van Amsterdam.

De vegetatiekundige pendant van het onderzoek is door ing. B.A.M. Peters en dr. ir. W.H. van der Putten van het Centrum voor Terrestrische Oecologie van het Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek (NIOO) te Heteren, in samenwerking met dr. O.F.R. van Tongeren van Data-Analyse Ecologie te Westervoort uitgevoerd.

Het onderzoek is gefinancierd door het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) in Den Haag, en door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (RWS-DWW), ten behoeve van de werkgroep Zandige Kust van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, te Delft. De begeleidingscommissie is gevormd door drs. R. Hillen en drs. J.H.M. de Ruig, beiden van het Rijksinstituut voor Kust en Zee en door drs. G. Veenbaas en drs. M.A.M. Löffler van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat.

D. van der Wal
Universiteit van Amsterdam
Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium
Nieuwe Prinsengracht 130
1018 VZ Amsterdam

B.A.M. Peters
W.H. van der Putten
Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek
Centrum voor Terrestrische Oecologie
Postbus 40
6666 ZG Heteren

O.F.R. van Tongeren
Data-Analyse Ecologie
Waemelslant 27
6931 HS Westervoort

BIJLAGEN

1. Lijst van symbolen
2. Gegevens van de winlokaties
3. Korrelgrootte-analyse
4. Korrelgrootte-analyse: Kop van Schouwen
5. Windtunnelproeven
6. Zandbudget per gebied
7. Aanstuiving
8. Verwachtingen en resultaten
9. Bepaling van de hellingshoek en de lengte van de helling

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING EN CONCLUSIES	1
1. INLEIDING	5
1.1. Probleemstelling	5
1.2. Doelstelling	7
1.3. Opzet van het rapport	7
2. STUIFGEVOELIGHEID VAN ZAND EN STUIFGEDRAG	9
2.1. Materiaal en methoden	9
2.1.1. Literatuurstudie en verwachtingen	9
2.1.2. Keuze van de onderzoekslokaties	9
2.1.3. Analyse van gegevens van het wingebied	10
2.1.4. Verwachtingen per suppletie	13
2.1.5. JARKUS/DONAR-bestand	13
2.1.6. Veldwerk	13
2.1.7. Windtunnelproeven	14
2.1.8. Korrelgrootte-analyse	15
2.1.9. Zandaanvoer	16
2.1.10. Conclusies	17
2.2. Literatuurstudie	17
2.3. Verwachtingen	22
2.4. Verwachtingen en resultaten per suppletie	24
2.4.1. Ameland: Midden-Ameland	24
2.4.2. Texel: Eierland	29
2.4.3. Texel: De Koog	34
2.4.4. Noord-Holland: Zwanenwater	34
2.4.5. Noord-Holland: Camperduin-Egmond	37
2.4.6. Rijnland: Meijndel	41
2.4.7. Goeree: Kwade Hoek	44
2.4.8. Schouwen: Kop van Schouwen	44
2.4.9. Walcheren: Westkapelle-Zoutelande	49
2.5. Conclusies	50
2.5.1. Materiaaleigenschappen	50
2.5.2. Stuifgevoeligheid van zand	52
2.5.3. Verstuiving	57
3. HELMVITALITEIT EN SOORTENSAMENSTELLING	63
3.1. Materiaal en methoden	63
3.1.1. Algemene aanpak vegetatiekundig deelonderzoek	63
3.1.2. Literatuurstudie	63
3.1.3. Veldwerk en dataverwerking	63
3.1.4. Koppeling veldgegevens aan JARKUS/DONAR-bestand	70
3.1.5. Voorstellen monitoring toekomstige effecten zandsuppleties	70
3.2. Literatuurstudie	72
3.2.1. Helmvitaliteit	72
3.2.2. Soortensamenstelling	73
3.3. Opstelling van hypothesen voor ontwikkeling van helmvitaliteit en soortensamenstelling	75
3.4. Resultaten veldwerk	78
3.4.1. Analyse van variantie die niet door zandsuppleties wordt verklaard m.b.v. redundantie-analyse	78
3.4.2. De invloed van zandsuppletie op de vegetatie: Redundantie-analyse met correctie	

voor niet-manipuleerbare milieuvariabelen	82
3.4.3. Vergelijking tussen natuurlijke variatie en invloed van zandsuppleties	83
3.4.4. Analyse van de helm vitaliteit in relatie tot zandsuppleties	85
3.4.5. Overige analyses uitgevoerd op de gegevens	86
3.5. Koppeling veldgegevens aan JARKUS/DONAR-bestand	86
3.6. Toekomstige monitoring helm vitaliteit en soortensamenstelling m.b.t. zandsuppleties	89
3.6.1. Mogelijke doelstellingen	89
3.6.2. Plan van aanpak voor monitoring op lokaal niveau	90
3.6.3. Soortensamenstelling en abundantie van de vegetatie	93
4. AANBEVELINGEN VOOR TOEKOMSTIGE ZANDSUPPLETIES	97
4.1. Onderzoek op de winlokatie	97
4.2. Keuze van het suppletiezand	98
4.3. Monitoring van de effecten van zandsuppleties	99
5. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	101
5.1. Invloed van zandsuppletie op het stuifgedrag	101
5.2 Relatie samenstelling suppletiezand en vegetatie-ontwikkeling	104
LITERATUUR	107

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Sinds 1990 worden langs de Nederlandse zandige kust regelmatig zandsuppleties uitgevoerd om de kustlijn te handhaven. Suppleren is een natuurvriendelijke methode van kustverdediging, omdat het principe weinig afwijkt van de wijze waarop de kust onder natuurlijke omstandigheden in stand wordt gehouden. Het suppletiezand wijkt echter af van het zand dat op natuurlijke wijze het strand bereikt, doordat suppletiezand de werking van stromingen en golfwerking niet heeft ondergaan en doordat het afkomstig is uit gebieden met een over het algemeen grote variatie in afzettingen. Het heeft hierdoor vaak een andere korrelgrootte-verdeling en kan gebiedsvreemd materiaal zoals bijvoorbeeld klei, silt, grind en organische stof bevatten. De consequentie is dat suppletiezand een andere verstuiwingskarakteristiek kan hebben dan het van nature aanwezige strandzand, hetgeen weer gevolgen kan hebben voor de zandaanvoer en daarmee voor de vegetatie en duinvorming.

Een inventariserend geomorfologisch en ecologisch onderzoek is uitgevoerd naar de gevolgen van zandsuppleties voor de zeereep. De relatie tussen de analyse-resultaten van monsters uit de winlokatie en uit het veld en de verstuiwbaarheid van het zand is vastgesteld. Voor een aantal zandsuppletielokaties is de verstuiwbaarheid van het zand gerelateerd aan de mate van zandinstuiving. Tevens is nagegaan wat de effecten zijn van zandsuppleties op de helm vitaliteit en de soortensamenstelling van de zeereepvegetatie. Een voorstel voor monitoring van effecten van zandsuppleties is uitgewerkt en kennisleemten zijn vastgesteld en op grond hiervan zijn voorstellen voor nader onderzoek gedaan. De belangrijkste resultaten en conclusies van het onderzoek zijn hieronder samengevat.

Kunnen op grond van de op de winlokatie bepaalde gegevens van het zand voorspellingen worden gedaan over het stuifgedrag van suppletiezand?

De op de winlokatie bepaalde materiaaleigenschappen van het zand zijn een indicatie voor de verstuiwingsgevoeligheid van het zand in het veld, drie van de vier geverifieerde situaties leverden een betrouwbare voorspelling op.

- De voorspelde matige stuifgevoeligheid, waarbij de verstuiwing voornamelijk beperkt wordt door schelpenvloertjes, is voor Ameland uitgekomen.
- De materiaaleigenschappen van het suppletiezand op Texel zijn redelijk voorspeld, maar de stuifgevoeligheid van het pas opgebrachte (goed gesorteerde en cohesielose) suppletiezand was in tegenstelling tot de verwachting zeer hoog.
- De voorspelling van de hoge stuifgevoeligheid van het zand dat tussen Camperduin en Egmond is opgebracht, is uitgekomen. Zoals verwacht leek ook hier de verstuiwing beperkt door de ontwikkeling van schelpenvloertjes.
- In Rijnland werd matig stuivend zand verwacht, waarbij schelpen en in mindere mate de korrelgrootte-verdeling en het gehalte aan organische stof niet gunstig zijn voor zandtransport. Hoewel geen windtunnelproeven met het zand zijn uitgevoerd, leek het zand enigszins stuifgevoeliger dan voorspeld. Organische stof was geen beperkende factor bij de verstuiwing.
- De voorspelling voor Schouwen, matig stuifgevoelig zand, waarbij schelpen, slib en organische stof voor een verminderde stuifgevoeligheid zorgen, is uitgekomen.

De mediaan, de korrelgrootte-verdeling en het slib- en schelpgehalte moeten alle in beschouwing worden genomen bij het opstellen van de verwachting ten aanzien van de verstuiwbaarheid. Tevens moet de *variatie* in materiaaleigenschappen in zowel de horizontale als in de verticale richting van het wingebied worden ingeschat. Dit kan alleen als meer gegevens van de samenstelling van het zand (uit geostatistisch onderzoek) op de winlokatie voorhanden zijn.

Welke parameters zijn bepalend voor de verstuivingsgevoeligheid van zand?

In het onderzoek is veel aandacht besteed aan de materiaaleigenschappen van zand en hun invloed op de verstuiving. De mediaan, de sortering, het gehalte aan fijne deeltjes en het gehalte aan grove delen zijn uitgezet tegen de in de windtunnel bepaalde stuifgevoeligheid van het zand.

De *mediaan* is geen goede maat voor de erodeerbaarheid van suppletiezand. Zand kan een identieke mediaanwaarde hebben, maar sterk verschillen in korrelgrootte-verdeling en daardoor een groot verschil in stuifgevoeligheid veroorzaken.

De *korrelgrootte-verdeling* is sterk bepalend voor de stuifgevoeligheid van het zand. De uniformiteitscoëfficiënt ($U = d_{60}/d_{10}$ in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$) is een goede maat om de stuifgevoeligheid van zand mee te typeren: er is een omgekeerd rechtevenredig verband tussen de uniformiteitscoëfficiënt en de verstuiving. Ook de standaarddeviatie van de korrelgrootte-verdeling (σ in phi-eenheden) is een goede maat voor de stuifgevoeligheid. Er blijkt een grove scheiding op te treden tussen de standaarddeviatie van suppletiezand en die van het in alle gevallen goed gesorteerde zand uit de referentiegebieden. Bij slecht gesorteerd zand ($\sigma > 0.4$) is er een duidelijk omgekeerd rechtevenredig verband met de verstuiving.

De sortering van suppletiezand wordt met name bepaald door de gehalten aan zeer fijne ($< 75 \mu\text{m}$) en zeer grove ($> 600 \mu\text{m}$) deeltjes en door de verhouding tussen zeer fijne en zeer grove delen. Bij een gehalte van minder dan 0.05% aan zeer fijne deeltjes wordt de stuifgevoeligheid niet nadelig beïnvloed. In de praktijk zijn *kleideeltjes* van grotere invloed op de verstuiving dan *organische stof*. Voor alle onderzoekslokaties geldt dat als het suppletiezand veel fijn materiaal bevat, het ook rijk is aan *schelpfragmenten*. Zand met veel deeltjes in de fractie 600-2000 μm ($> 2.5\%$) kan nog een matige stuifgevoeligheid hebben, maar zand waarvan meer dan 10% van de gewichtsfractie grover is dan 2000 μm is in alle gevallen weinig stuifgevoelig. Bij deflatie blijft de grove fractie grotendeels achter en vormt een afdekkende laag waar de wind geen vat meer op kan krijgen. *Grind en stenen* zijn alleen op Texel aangetroffen en beperken de verstuiving alleen als ze in combinatie met schelpen voorkomen. Een combinatie van een hoog gehalte aan zeer fijne deeltjes en een hoog gehalte aan grove delen is wel in suppletiezand maar niet in het zand uit referentiegebieden gevonden.

Zijn er correlaties tussen de eigenschappen van suppletiezand en transport naar de zeereep?

Uit de gegevens van het JARKUS/DONAR-bestand is voor ieder jaar in de periode 1985-1993 de aanstuiving naar de zeereepkruin bepaald. De waargenomen variatie in ruimte en tijd in aanstuiving is groot. De verschillen worden veroorzaakt door variaties in hydraulische en meteorologische omstandigheden, de ligging van de kust, de vegetatiebedekking en -hoogte en de topografie van strand en zeereep en door kustbeheersmaatregelen, zoals zandsuppletie, maar kunnen ook het gevolg zijn van systematische en andere fouten en van de meetnauwkeurigheid van de JARKUS-gegevens.

De aanstuiving van suppletiezand neemt toe met toenemende waarde van de in de windtunnel bepaalde stuifgevoeligheid van het zand.

- Direct na het opbrengen van het zand is op Texel een toename in de aanstuiving waargenomen, hetgeen strookt met de hoge initiële stuifgevoeligheid van het zand. Drie jaar nadat de suppletie is opgebracht, is de aanstuiving weer gereduceerd tot de voor de lokatie 'normale' waarde.
- De trend in aanstuiving in het suppletiegebied bij Bergen is vergelijkbaar met de temporele variabiliteit in aanstuiving in het referentiegebied bij Schoorl. De materiaaleigenschappen van het zand dat gebruikt is voor de suppletie bij Bergen benaderen die van het zand uit het

nabijgelegen referentiegebied.

- Voor Ameland en Schouwen is er geen of nauwelijks aanstuiving waargenomen in het derde en vierde jaar nadat de zandsuppletie is opgebracht. De stuifgevoeligheid is in die gevallen ook laag ten gevolge van schelpenvloertjes. Mogelijk hebben de schelpenvloertjes zich juist hier, op de duinfrontsuppletie, kunnen ontwikkelen omdat ze niet door de zee worden omgewoeld.

In alle onderzochte gevallen is het suppletiezand minder stuifgevoelig dan het zand uit het nabijgelegen referentiegebied, waarbij moet worden opgemerkt dat voor Texel geen referentiegebied is gevonden. Het blijkt echter dat de aanstuiving op Ameland, bij het Zwanenwater, bij Bergen en op Schouwen toeneemt in het tweede jaar nadat de suppletie is opgebracht en in een aantal gevallen significant hoger is dan de aanstuiving voorafgaand aan de suppletie. Mogelijk is zandsuppletie nog op een andere wijze van invloed op de aanstuiving naar de zeereepkruin (bijvoorbeeld door het 'uitzakken' van de zandsuppletie, door ontzilting etc.).

Wat zijn de sturende parameters voor de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling in de zeereep?

De belangrijkste sturende milieufactor voor de vitaliteit van helm is de zandinstuiving. Bij de verwerking van de veldgegevens waren geen gegevens van de zandinstuiving voorhanden. Daarom is de strandbreedte meegecorrleerd, omdat werd aangenomen dat de zandinstuiving in het algemeen toeneemt naarmate de strandbreedte toeneemt. Strandbreedte is niet de enige factor die voor de helm vitaliteit van belang is. Alle andere milieufactoren (hellingshoek, expositie, kalkgehalte, etc.) die een effect hebben op het zandtransport vanaf het strand naar de zeereep kunnen de vitaliteit van helm mee beïnvloeden.

Gedurende het onderzoek kwamen voor een aantal lokaties zandinstuifgegevens beschikbaar. Naarmate meer zand in de helmbegroeiing werd afgezet, nam de helm vitaliteit trendmatig toe, hetgeen in overeenstemming was met de verwachting. Voor de praktijk zijn de gegevens van het JARKUS/DONAR bestand echter te onnauwkeurig voor de inschatting van de ontwikkeling van de helm vitaliteit in individuele vakken van 200 à 250 meter (tussen twee opeenvolgende raaien van strandpalen). De reden hiervoor is, dat de variatie tussen twee strandpalen relatief groot is. Het HELMGIS, een methode die door de Meetkundige Dienst is ontwikkeld, is een betere techniek om de ontwikkeling van de helm vitaliteit te volgen.

De soortensamenstelling van de zeereepvegetatie wordt in grote mate bepaald door de lokatie. Het kalkgehalte van het zand, dat tevens gebiedsafhankelijk is, speelt hierbij een belangrijke rol, maar ook de lengte van de zeereephelling en de expositie correleren duidelijk met de soortensamenstelling. In het algemeen nam het totaal aantal soorten af naarmate de zandinstuiving toenam. Zeereepvegetatie is van nature soortenarm en het bleek ook, dat naarmate de zandaanvoer toenam voornamelijk de zeereepgebonden plantesoorten overbleven.

Is de vitaliteit van helm op suppletielokaties significant anders dan op referentielokaties?

Ten aanzien van vergelijking van zowel de helm vitaliteit als de soortensamenstelling van referentie- en suppletielokaties bleek, dat zodanig veel factoren een rol spelen bij de vegetatieontwikkeling, dat eventuele effecten van zandsuppleties letterlijk in de ruis verloren gaan. Als er een effect van zandsuppleties op de helm vitaliteit aantoonbaar zou zijn, is dit zwak positief op de helling en de top van de zeereep. Deze vitaliteitstoename begint pas het tweede jaar na zandsuppletie en verdwijnt weer na het tweede jaar. De vitaliteit neemt dan zelfs enigszins af. Het effect van zandsuppleties op de helm vitaliteit is dus, *gemiddeld genomen*, kortstondig positief.

Is de soortensamenstelling van de zeereepvegetatie op suppletielokaties significant anders dan op de referentielokaties?

Zandsuppleties verklaren slechts 2.3% van de waargenomen verschillen in de samenstelling van de zeereepvegetatie. Gezien de geringe verklaarde variantie en de mogelijke beïnvloeding hiervan door milieuvariabelen waarvoor uiteindelijk niet gecorrigeerd is, kan met behulp van het huidig verzamelde gegevensbestand geen effect van zandsuppleties op de soortensamenstelling van de zeereepvegetatie worden aangetoond.

Zijn er correlaties tussen enerzijds de eigenschappen van suppletiezand en anderzijds de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling in de zeereep?

De JARKUS/DONAR gegevens van de instuiving van zandinstuiving op de zeereepkruin zijn gebruikt voor correlatie met de helm vitaliteit en de soortensamenstelling. Vergelijking van kustvakken met veel en weinig zandaanstuiving levert in grote lijnen een beeld op dat op grond van literatuurgegevens is verwacht: veel instuiving resulteert in vitale helm en weinig plantesoorten, terwijl bij geringe instuiving de helm vitaliteit laag is en het aantal soorten hoog.

De suppleties op Texel bij De Koog en op Eierland bijvoorbeeld zijn uitgevoerd met grof, maar goed gesorteerd en cohesieloos zand, dat daarom goed stuift. Er is een toename in de aanstuiving naar de zeereep gemeten en de helm is op de gehele zeewaartse helling zeer vitaal, terwijl het aantal plantesoorten gering is. Van de eenjarigen komt alleen nog zeeraket en loogkruid voor. Op de Kop van Schouwen verstuipt aanmerkelijk minder zand, hetgeen ook in de geringe helm vitaliteit en het relatief hoge aantal soorten tot uiting komt. Zandtransport naar de zeereep is echter ook een beperkende factor in het referentiegebied op Schouwen, waar het zand aan de duinvoet voor de zeereep wordt ingevangen.

Ten aanzien van de verstuijbaarheid heeft suppletiezand dus eenzelfde effect op de helm vitaliteit en de soortensamenstelling als strandzand: naarmate de verstuijbaarheid groter is zal (binnen een instuiftraject van 20 tot 80 cm per jaar) de helm vitaliteit toenemen en het aantal plantesoorten afnemen. Voor wat betreft de effecten van de samenstelling van suppletiezand is het van belang dat het suppletiezand zoveel mogelijk, vooral qua kalkgehalte, overeenkomt met dat van het ter plaatse aanwezige strandzand. Op grond van dit onderzoek kunnen geen conclusies worden getrokken over de effecten van zandsuppleties op de vegetatieontwikkeling in zeewerende duinen op langere termijn.

Hoe kunnen de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling worden beïnvloed met zandsuppleties?

De vitaliteit van helm kan worden bevorderd en het aantal plantesoorten in de zeereep wordt gereduceerd indien de verstuijbaarheid van suppletiezand, binnen bepaalde grenzen (20 tot 80 cm per jaar) toeneemt. Hierdoor zal de zeereep een natuurlijker aanblik krijgen.

1. INLEIDING

1.1. Probleemstelling

Naar aanleiding van de nota 'Kustverdediging na 1990' en de door de Tweede Kamer gemaakte beleidskeuze voor het dynamisch handhaven van de kustlijn (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990) worden regelmatig zandsuppleties uitgevoerd langs delen van de Nederlandse kust waar de duinvoet met structurele erosie wordt bedreigd.

Eén van de uitgangspunten van de beleidskeuze is dat deze vorm van erosiebestrijding het beste in het landschap past: het oorspronkelijke strand en de duinen blijven bij zandsuppletie intact.

Tot op heden is echter nog niet goed bekend in hoeverre het suppletiezand hetzelfde reageert op geomorfologische processen als het zand dat van nature aanwezig is. Uit eerder door het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium verricht onderzoek (Olij, 1993), is naar voren gekomen dat het suppletiezand in de Kop van Noord-Holland en op Texel in een aantal opzichten afwijkt van oorspronkelijk strandzand.

Door de afwijkende eigenschappen verschilt de verstuiwingskarakteristiek van suppletiezand van die van het originele zand. Als gevolg hiervan, maar ook door bijvoorbeeld veranderde vochtcondities als gevolg van zandsuppletie, kan de zandaanvoer van strand naar duinen worden gewijzigd. Teveel aanstuiving kan leiden tot een extreme overstuiving van het duingebied en negatieve effecten hebben op recreatie, bebouwing en waterwinning en natuur. Te weinig verstuiwing kan leiden tot een statisch duingebied en tot aantasting van de helm.

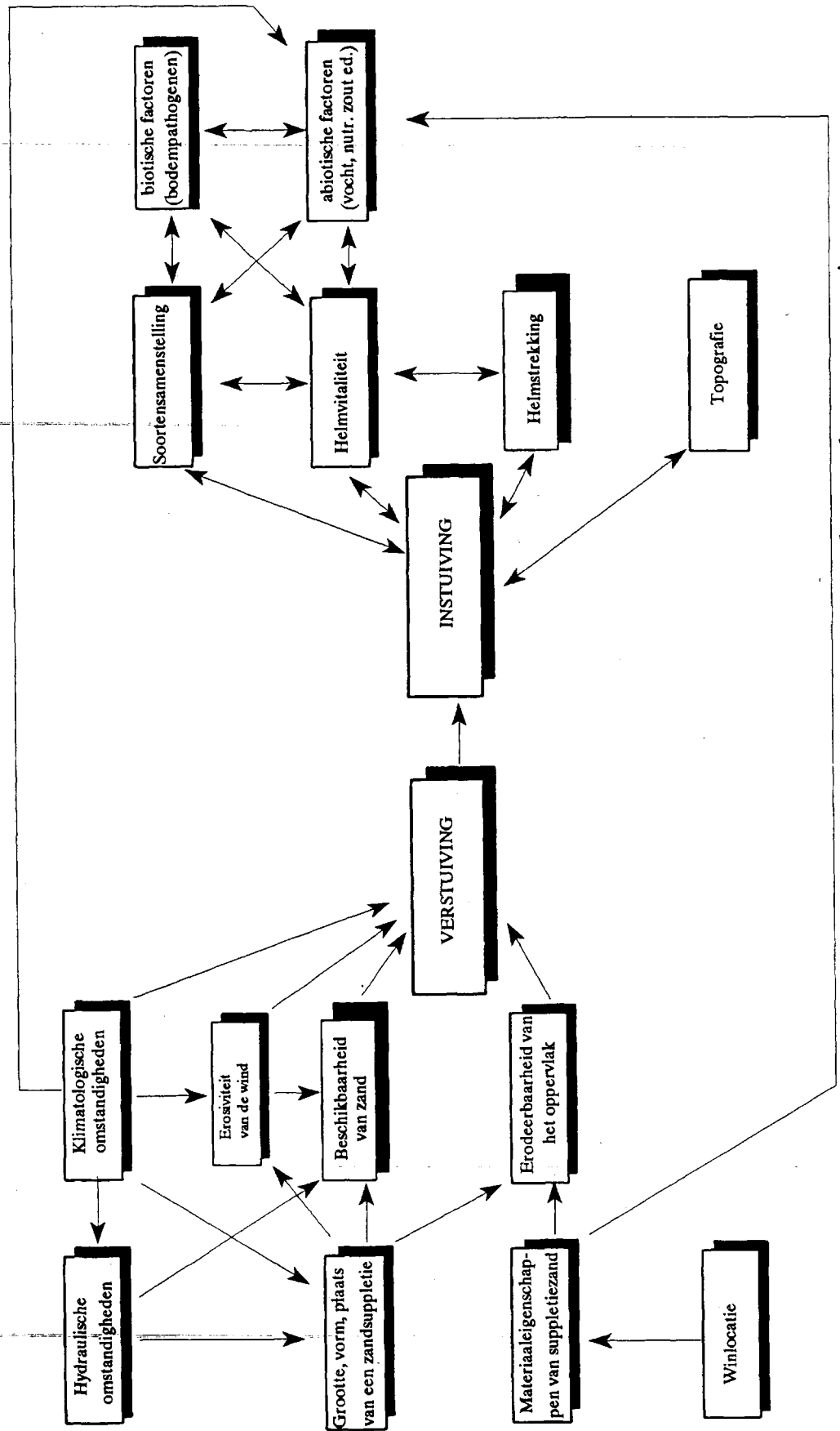
Zandaanstuiving is namelijk een van de belangrijkste sturende factoren voor duinvorming en vegetatieontwikkeling in de zeereep. De helmbegroeiing brengt het naar de zeereep stuivende zand tot rust en legt het met het wortelstelsel vast. Helm kan jaarlijks hoeveelheden zand invangen tot ongeveer een meter. Doordat de helmplanten in staat zijn steeds weer door de afgezette laag ingestoven zand heen te groeien, leidt deze wisselwerking tussen zandaanvoer en plantengroei tot natuurlijke duinvorming. De hoogte en breedte van de duinenrij nemen toe onder invloed van het door de wind aangevoerde zand en er ontstaat een natuurlijk reliëf.

Regelmatige aanvoer van stuivend zand is van essentieel belang voor de vitaliteit van de helmbegroeiing. De planten zijn zo voortdurend in staat nieuwe wortels te vormen. Het is bekend dat het verse zand geen schadelijke bodemorganismen bevat, zodat helm letterlijk ontsnapt aan de bodemziekten. Teveel zand leidt tot verstikking van de planten, doordat de jaarlijkse strekingsmogelijkheden van de plant niet onbeperkt zijn. Indien te weinig zand wordt aangevoerd, gaat de vitaliteit van de planten achteruit doordat schimmels en aaltjes de helmwortels aantasten, met als gevolg dat de opname van vocht en voedingsstoffen wordt geremd.

Bij het landwaarts afnemen van de zandaanvoer, wordt helm op natuurlijke wijze vervangen door opvolgende plantesoorten. De zeewaartse uitbreiding van deze opvolgers wordt van nature beperkt door een combinatie van zanddepositie en zoutspray. Wanneer de zandaanvoer plotseling geheel stagneert, begint het proces van helmdegeneratie binnen één jaar en kan een gezonde helmbegroeiing na enkele jaren aanzienlijk verzwakt zijn. Als dit proces snel verloopt zonder dat opvolgende plantesoorten de zandbindende functie van helm overnemen, ontstaan kale erosiegevoelige plekken in de zeereep.

De zeereepvegetatie bestaat niet alleen maar uit dominante zandbindende plantesoorten. Er is tevens een aantal karakteristieke begeleidende plantesoorten, zoals blauwe zeedistel, zeewolfsmelk, zeeraket, melkdistel, zeewinde en gele hoornpapaver (Bakker, 1976). Een aantal van deze plantesoorten staat op de rode lijst van bedreigde soorten. Het is niet bekend in hoeverre met zandsuppletie eveneens ingegrepen wordt op de samenstelling van de begeleidende zeereepflora.

Aangezien het zandsuppletieprogramma nu een aantal jaren loopt, is het zinvol een analyse te maken van de effecten van deze kustverdedigingsmaatregel op de geomorfologie en vegetatieontwikkeling in de zeereep. De relaties tussen zandsuppleties en de mogelijke effecten ervan op de zandaanstuiving en vervolgens op de zeereepvegetatie zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. De relaties tussen de mogelijke effecten van zandsuppleties op de verstuing en, vervolgens op de zeereep vegetatie.

1.2. Doelstelling

De doelstellingen van het onderzoek zijn opgesplitst in vragen die betrekking hebben op de abiotiek, de biotiek en de relatie tussen deze beide aspecten.

Het geomorfologisch deelonderzoek heeft met name betrekking op stuifgevoeligheid en stuifgedrag van suppletiezand. De volgende vragen zijn aan de orde.

- Kunnen op grond van de op de winlokatie bepaalde gegevens van het zand voorspellingen worden gedaan over het stuifgedrag van suppletiezand?
- Welke parameters zijn bepalend voor de verstuiwingsgevoeligheid van zand?
- Zijn er correlaties tussen de eigenschappen van suppletiezand en transport naar de zeereep?

Bij het vegetatiekundig deelonderzoek wordt de helm vitaliteit en de soortensamenstelling bestudeerd.

- Wat zijn de sturende parameters voor de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling in de zeereep?
- Is de vitaliteit van helm op suppletielokaties significant anders dan op referentielokaties?
- Is de soortensamenstelling van de zeereepvegetatie op suppletielokaties significant anders dan op de referentielokaties?

De bevindingen van het geomorfologisch en vegetatiekundig deelonderzoek worden gekoppeld en moeten leiden tot een antwoord op de volgende vragen.

- Zijn er correlaties tussen enerzijds de eigenschappen van suppletiezand en anderzijds de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling in de zeereep?
- Hoe kunnen de vitaliteit van de helm en de soortensamenstelling worden beïnvloed met zandsuppleties?

Daarnaast wordt aandacht besteed aan het:

- formuleren van concrete aanbevelingen voor nog uit te voeren zandsuppleties
- signaleren van kennisleemten en het formuleren van aanbevelingen voor eventueel vervolgonderzoek.

1.3. Opzet van het rapport

In hoofdstuk 1 zijn het kader en de doelstellingen van het onderzoek geschetst. In hoofdstuk 2 wordt het geomorfologisch deel van het onderzoek gerapporteerd. De methoden voor het bepalen van de karakterisering, stuifgevoeligheid en het stuifgedrag van (suppletie)zand komen aan de orde. Een literatuurstudie naar de factoren die invloed hebben op de verstuiwing leidt tot de formulering van een aantal algemene verwachte effecten, die in paragraaf 2.4 per suppletie nader zijn uitgewerkt en worden getoetst. Tot slot worden in dit hoofdstuk conclusies getrokken over materiaaleigenschappen, stuifgevoeligheid en verstuiwing van suppletiezand.

Hoofdstuk 3 bevat de aanpak en resultaten van het onderzoek naar de helm vitaliteit en de soortensamenstelling en hun relatie tot de aanstuiving. De methoden, die gebruikt zijn voor het veldonderzoek en de data-analyse zijn beschreven, er is een literatuurstudie verricht en er zijn conceptuele modellen ontwikkeld. De resultaten van het veldonderzoek worden weergegeven en bediscussieerd en in verband gebracht met de aanstuiving. In de laatste paragraaf worden conclusies uit het vegetatiekundig onderzoek getrokken.

De resultaten leiden tot aanbevelingen voor de uitvoering van toekomstige zandsuppleties (hoofdstuk 4) en tot aanbevelingen voor concreet vervolgonderzoek (hoofdstuk 5).

2. STUIFGEVOELIGHEID VAN ZAND EN STUIFGEDRAG

2.1. Materiaal en methoden

2.1.1. Literatuurstudie en verwachtingen

Allereerst is een literatuurstudie uitgevoerd naar de verstuiwing van zand naar de zeereep en de invloed van atmosferische parameters, materiaaleigenschappen en topografie en ruwheid op het verstuiwingsproces.

Vervolgens zijn verwachtingen uitgesproken over de invloed van de factoren die door zandsuppletie worden aangestuurd. Met name materiaaleigenschappen (die de stuifgevoeligheid van zand bepalen) komen aan bod. Deze hypothesen zijn door middel van het onderzoek getoetst.

2.1.2. Keuze van de onderzoekslokaties

De stuifgevoeligheid van zand is op de volgende lokaties langs de Nederlandse kust onderzocht:

- Ameland: Midden-Ameland en Bornrif
- Texel: Eierland
- Noord-Holland: Zwanenwater
- Noord-Holland: Camperduin-Egmond
- Rijnland: Meijndel
- Schouwen: Kop van Schouwen.

Van deze gebieden en de volgende drie lokaties is ook de aanstuiving bepaald:

- Texel: De Koog
- Goeree: Kwade Hoek
- Walcheren: Westkapelle-Zoutelande.

De gebieden zijn zo gekozen, dat een grote variatie is verkregen ten aanzien van de volgende factoren:

- materiaaleigenschappen van de suppletie
- frequentie van opbrenging van suppletiezand in het gebied
- ouderdom van de suppletie
- methode van opbrenging en vormgeving.

Verder is rekening gehouden met:

- mogelijkheden voor een zogenaamde referentiesituatie
- geografische spreiding van de onderzoekslokaties
- beschikbaarheid van gegevens.

De onderzoekslokaties overlappen grotendeels met de gebieden waar de helm vitaliteit en de soortensamenstelling in kaart is gebracht (zie hoofdstuk 3). In Figuur 2 is de ligging van de onderzoekslokaties van zowel het geomorfologisch als het vegetatiekundig onderzoek weergegeven.

Op een aantal lokaties is meermalen gesuppleerd (Midden-Ameland, Eierland, De Koog, Bergen, Kop van Schouwen, Walcheren), op twee lokaties slechts éénmaal (Zwanenwater en ten dele Camperduin-Egmond) en in één gebied (Meijndel) heeft na aanvang van het project een eerste suppletie plaatsgevonden, zodat zowel voorafgaand als na suppletie is bemonsterd.

Op Eierland is bij aanvang van het onderzoek een suppletie gedeeltelijk uitgevoerd, het werk wordt tot in 1995 voortgezet. Zo kan tegelijkertijd zand van een vorige suppletie en zand dat in 1994 is opgebracht, worden bemonsterd.

Er is geen veldwerk verricht in het suppletiegebied bij het Zwanenwater. Gegevens zijn ontleend aan de bestekcontrole (Rijkswaterstaat, Noord-Holland, 1987) en aan Olij (1993), die het gebied in

1991 bemonsterde.

Naast suppletielokaties is ook een aantal referentielokaties gekozen: dit zijn gebieden waar niet is gesuppleerd. De referentielokaties liggen dicht bij het gesuppleerde gebied (met uitzondering van de Kwade Hoek op Goeree), om het mogelijk te maken uitspraken te kunnen doen over de stuifgevoeligheid en het stuifgedrag van het oorspronkelijke strandzand, zonder dit zand te hoeven bemonsteren.

Voorafgaand aan het bespreken van de resultaten, worden per onderzoekslokatie de suppletiewerkzaamheden kort beschreven. De projectgegevens worden bijgehouden door de betrokken directies van Rijkswaterstaat.

2.1.3. Analyse van gegevens van het wingebied

Sedimentologisch onderzoek naar geschikte winlokaties wordt ofwel door de betrokken directies van Rijkswaterstaat zelf of in hun opdracht door de afdeling Mariene Geologie van de Rijks Geologische Dienst te Haarlem uitgevoerd. Er worden beschrijvingen van boringen gemaakt en soms worden uit de boorkernen monsters genomen en in een laboratorium nader geanalyseerd.

De in de boorstaten opgenomen beschrijvingen van de hoeveelheid en de hoedanigheid van klei, silt, schelpen, grind en stenen, organische stof en kalk zijn voor dit onderzoek in twee klassen verdeeld om ze met elkaar te kunnen vergelijken (Bijlage 1). In Bijlage 2 worden deze klassen aangeduid met - (niet of nauwelijks aanwezig) of + (aanwezig).

Deze eigenschappen en de van de korrelgrootte-verdeling bepaalde parameters worden hieronder omschreven.

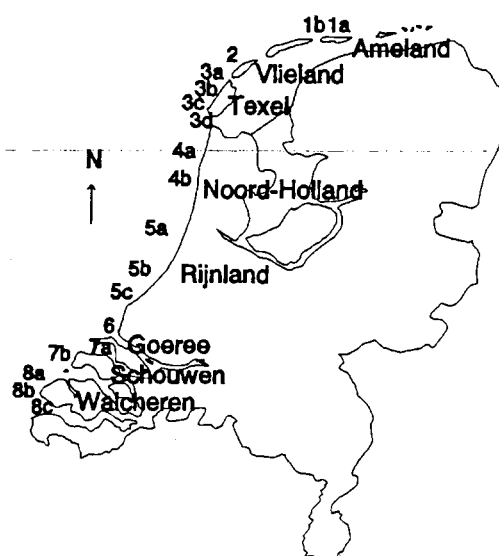
- Korrelgrootte

'Zand' bestaat uit een mengsel van deeltjes met verschillende korrelgrootten. Door het zand over een aantal zeven met verschillende maaswijdten te halen, worden de deeltjes in het zand ingedeeld in korrelgrootte-klassen, die kunnen worden uitgedrukt in micrometer (μm) of in phi, met $\text{phi} = -\log_2 d$, waarin d de korrelgrootte in millimeter is (Wentworth-schaal). Als deze klassen worden uitgezet tegen het gewicht van de deeltjes in een klasse in procenten van het gewicht van alle deeltjes, ontstaat een histogram. Het is ook mogelijk een sommatiecurve (zeefkromme) te tekenen, waarin het cumulatieve gewichtspercentage staat uitgezet tegen de gelineariseerde logaritmische korrelgrootte, zodat de grootte van de klassen gelijk is (zie bijvoorbeeld Figuur 3). Uit deze grafiek kan een aantal belangrijke parameters worden afgelezen. Eén van die parameters is de mediaan, die wordt bepaald door het snijpunt van de kromme met de horizontale lijn waarbij het cumulatieve gewichtspercentage 50% is: het is dus de korrelgrootte in micrometer (μm), waarbij 50% van het gewichtspercentage fijner is. De mediaan (d_{50}) is een veel gebruikte maat voor de korrelgrootte.

De uitkomst is afhankelijk van de wijze waarop het zand wordt gezeefd. Soms worden organische stof, kalk en ijzer vooraf verwijderd, zodat alleen de minerale delen overblijven, bij andere proeven is de fractie $> 1000 \mu\text{m}$ eerst afgezeefd om het effect van (grote) schelpfragmenten te vermijden, maar bij de meeste proeven wordt het zand onbehandeld gezeefd. Daarnaast wordt de waarde van de mediaan enigszins beïnvloed door het gekozen aantal zeven en de maaswijdte van de zeven.

Tegenwoordig wordt ook wel gebruik gemaakt van de laser-diffractiemethode om de korrelgrootte(-verdeling) te bepalen. Het principe berust op het meten van het verstrooiingspatroon dat zandkorrels veroorzaken als ze in een bundel (laser-)licht worden gebracht. De resultaten zijn niet direct vergelijkbaar met de uitkomsten van gezeefd zand, doordat langwerpige deeltjes zich richten naar de kleinste diameter als zij door de zeven gaan. De mediaanwaarden die zijn bepaald door middel van zeven kunnen tot 20% lager zijn dan de waarden die met de laser counter worden gemeten.

Figuur 2. Ligging van de onderzoekslokaties.



Kustvak	Lokatie	Laatste suppletie	Zandsamenstelling	Zandaanvoer	Vegetatie
1. Ameland	a. Midden	1990/1992	RSP 15.00*	RSP 13.00-15.80	RSP 15.40-16.00
		1992	RSP 12.00*, 12.20	-	RSP 12.60-13.20
		Referentie	RSP 8.40*, 8.60	RSP 7.40-9.20	RSP 8.00-10.00
	b. Borrif	Referentie	RSP 3.20	RSP 3.20-5.00	RSP 2.00-6.00
2. Vlieland	Midden	Referentie	-	-	RSP 47.00-50.20
3. Texel	a. Eierland	1990	RSP 29.00	RSP 25.80-29.00	-
		1990/1994	RSP 26.60*, 26.80		-
		1994	RSP 27.40*, 27.60		-
	b. De Koog	1991	-	RSP 21.11-21.51	RSP 20.20-23.00
	c. Zuidwest	1993	-	-	RSP 9.40-12.60
	d. De Hors	Referentie	-	-	RSP 8.00-9.00
4. Noord-Holland	a. Zwanenwater	1987	RSP 14.83, 17.48	RSP 14.62-18.08	-
	b. Camperduin-Egmond	1992	RSP 32.40*	RSP 32.00-37.00	RSP 31.50-37.20
		Referentie	RSP 30.25*	RSP 30.00-31.50	RSP 31.20-31.50
5. Rijnland	a. Zandvoort	1994	-	-	RSP 58.00-62.00
	b. Noordwijk	Referentie	-	-	RSP 79.00-80.25
	c. Meijndel	1994	RSP 93.25	-	-
		Referentie	RSP 93.50*, 94.00, 94.50	RSP 93.00-95.50	-
6. Goeree	Kwade Hoek	Referentie	-	RSP 7.00-7.50	RSP 6.00-8.00
7. Schouwen	a. Noorderstrand	1994	-	-	RSP 1.00-3.00
	b. Kop	1991	RSP 13.083*, 13.3-45, 13.545	RSP 12.48-15.48	RSP 12.00-13.40, 15.20-17.00
		Referentie	RSP 10.241, 10.4-41*, 10.841	RSP 10.24-10.84	RSP 9.40-12.00
8. Walcheren	a. Domburg	1992	-	-	RSP 12.60-15.20, 15.60-18.00
	b. Westkapelle-Zoutelande	1992	-	RSP 23.74-24.70	RSP 23.00-26.20
	c. Zoutelande-Vijeter	1992	-	-	RSP 27.20-29.40

Naaft monsters voor korrelgrootte-analyse zijn ook volume-monsters voor windtunnelproeven genomen.

De korrelgrootte kan nog op een andere manier worden bepaald: met behulp van een vergelijkingsmicroscop kan de korrelgrootte worden geschat door zand, op een beeldscherm vergroot, te vergelijken met zand waarvan de korrelgrootte bekend is.

Als de mediaan van elke laag in de boorkern bekend is, wordt een gewogen gemiddelde berekend. In de tabellen (Bijlage 2) wordt aangegeven of het de mediaan van de totale gewichtsfractie d_{30} of de zandmediaan M (mediaan van de deeltjes met een korrelgrootte van 63 tot 2000 μm) betreft en of de mediaan met behulp van een vergelijkingsmicroscop (m), zeven (z) of met een laser counter (l) is bepaald.

- Korrelgrootte-verdeling

De Rijks Geologische Dienst bepaalt meestal de spreiding S , d.i. de grootte van het maximale gewichtspercentage materiaal van drie aangrenzende zeeffracties, waarbij de klassen 0.5 phi groot zijn. In dit rapport wordt deze spreidingsmaat verder S_{RGD} genoemd om verwarring met de hierna te behandelen maat voor sortering $S = d_{90}/d_{10}$ te voorkomen. $S_{\text{RGD}} < 60\%$ duidt op een grote spreiding (slechte sortering), een S_{RGD} tussen 60 en 70% duidt op een matige spreiding en $S_{\text{RGD}} > 70\%$ betekent een kleine spreiding (goede sortering).

Als het bereik aan korrelgrootten K wordt opgegeven, is hieruit de minimale en maximale korrelgrootte van het gehele boorprofiel bepaald.

Wanneer monsters in het laboratorium zijn geanalyseerd, kunnen de percentielen d_{60} en d_{10} (de korrelgrootten waarbij respectievelijk 60% en 10% van de gewichtsfractie fijner is) worden bepaald. De verhouding d_{60}/d_{10} (d.i. de gelijkmatigheidscoëfficiënt U) is een maat voor het gehalte aan fijne deeltjes in het zand en geeft de geschiktheid voor compactie van los materiaal weer. Als de gelijkmatigheidscoëfficiënt kleiner is dan 2 ('gelijkvormig zand') is het zand niet geschikt voor compactie en als de gelijkmatigheidscoëfficiënt groter is dan 3 ('normaal' zand) is het zand zeer geschikt voor compactie (Draga, 1983; Horikawa et al., 1986). In de bijlagen wordt vermeld of de berekeningen met behulp van zeefkrommen (z) of met behulp van analyses met de laser counter (l) zijn uitgevoerd.

- Klei (minerale delen $< 2\mu\text{m}$)

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig slib(laagjes), kleibanden, -brokken of insluitsels (-) en boorprofielen met tenminste één laag matig tot zeer slib- of kleihoudende zand (ook in brokken, banden of insluitsels) of klei (+).

- Silt (minerale delen $> 2\mu\text{m}$ en $< 63\mu\text{m}$)

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig silt- of slibinclusies, silt- of slibhoudend zand of silt- of sliblaagjes (-) en boorprofielen met tenminste één laag matig tot zeer silt- of slibhoudende zand of silt- of slibinsluitsels (+).

- Grind en stenen (minerale delen $> 2000\mu\text{m}$)

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder grind en stenen (-) en boorprofielen met tenminste één laag (zand) met grind en/of stenen (+).

- Organische stof (humus, veen en houtresten)

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig organisch materiaal (humus, veen, houtresten, detritus) (-) en boorprofielen met tenminste één laag met matig veel tot zeer veel organisch materiaal (+).

- Schelpgruis, schelpfragmenten en schelpen

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder schelp(fragment)en of met een spoor schelpgruis of enkele of weinig schelp(fragment)en (-) en boorprofielen met tenminste één laag met matig veel, tamelijk veel, veel, rijk en zeer rijk aan schelp(fragment)en (+).

- **Kalk**

Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen die gemiddeld kalkvrij zijn of een spoor of weinig kalk bevatten (-) en boorprofielen die gemiddeld matig of sterk kalkhoudend zijn (+).

De parameters en eigenschappen zijn per wingebied verzameld in tabellen (Bijlage 2). Van elk wingebied is daarnaast per parameter een 'overall' waarde bepaald van het totaal aantal boringen.

2.1.4. Verwachtingen per suppletie

Er is een voorspelling gedaan over de invloed van elk van de in het wingebied bepaalde parameters en materiaaleigenschappen op de stuifgevoeligheid van zand in het suppletiegebied. Tevens wordt per suppletie een schatting gemaakt van de hieruit voortvloeiende algehele stuifgevoeligheid van het gesuppleerde zand. Als uitgangspunt worden hiervoor de hypothesen gebruikt die zijn opgesteld naar aanleiding van de literatuurstudie (paragraaf 2.3).

Bij de interpretatie van de boorstaten en monster-analyses van de winlokatie is enige voorzichtigheid geboden. Binnen een groot onderzocht gebied is destijds, mede op grond van de boorgegevens, een winlokatie gekozen. Zand op de winlokatie is dus niet altijd representatief voor het zand uit de omgeving. In het uiteindelijk gekozen gebied zijn soms maar een paar boringen gezet.

2.1.5. JARKUS/DONAR-bestand

De zeereep wordt jaarlijks ingemeten langs raaien loodrecht op de kust, die worden aangeduid met Rijksstrandpaalnummers (hierna RSP genoemd). De gegevens worden opgeslagen in het JARKUS/DONAR-bestand van het Rijksinstituut voor Kust en Zee. Het bestand bevat kusthoogte- en kustdiepte-metingen. Voor dit onderzoek worden alleen de hoogtemetingen in beschouwing genomen, d.i. het dwarsprofiel landwaarts van de laagwaterlijn. De raaien liggen 200 tot 250 uit elkaar. Op de raai wordt elke 5 meter een hoogtewaarneming gedaan.

Van iedere raai in de onderzoeksgebieden worden met behulp van het programma KUSTLIJN van het RIKZ dwarsprofielen van de zeereep getekend, met daarin de hoogtemetingen van de periode 1985-1993. De profielen zijn een goed hulpmiddel bij het veldwerk (paragraaf 2.1.6) en het bepalen van depositie en erosie (paragraaf 2.1.9). Bovendien kan uit de profielen een schatting worden gemaakt van de breedte van het strand (paragraaf 2.5.3). Doordat suppleties over het algemeen in het late voorjaar of in het najaar plaatsvinden (om zowel onrustig weer als overlast voor de recreatie te vermijden) en de kusthoogtemetingen meestal in het voorjaar (na het stormseizoen) worden verricht, is de suppletie in de meeste gevallen pas zichtbaar in het dwarsprofiel van het eropvolgende jaar.

De hoogte wordt fotogrammetrisch bepaald. Met deze methode wordt een verticale meetfout geïntroduceerd van ten minste 10 centimeter (VEUGEN, 1984; ARENS, 1994). Het komt voor dat een raai in zijn geheel te hoog of te laag wordt opgemeten, bijvoorbeeld als gevolg van fouten bij het vereffen van de foto's. Door de JARKUS-profielen te bekijken, zijn deze raaien aan te wijzen en kan er bij de interpretatie van de gegevens rekening mee worden gehouden.

2.1.6. Veldwerk

Op basis van de dwarsprofielen zijn suppletie- en referentielokaties gekozen, waar monsters langs de JARKUS-raaien zijn genomen. Er is oppervlakkig bemonsterd op respectievelijk:

- het natte strand
- het droge strand

- de duinvoet
- de zeereepkruin en de
- binnenduinen, bij voorkeur de binnenzeereepvoet.

Voor de windtunnelproeven zijn daarnaast monsters van 12 à 36 kg genomen. De monsters van de referentielokaties zijn over het algemeen op het droge strand genomen en de monsters van de suppletielokaties zijn bij voorkeur genomen op de plaats waar onbewerkt suppletiezand aanwezig is. Op Texel is langs een raai een aantal grote monsters genomen.

2.1.7. Windtunnelproeven

Met behulp van windtunnelproeven is het stuifgedrag van het zand onderzocht. Er is gebruik gemaakt van de windtunnel van het Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO) te Haren.

De windtunnel, met een lengte van circa 20 meter, heeft een gesloten hoofdcircuit. De windsnelheid kan door middel van de draaisnelheid van een ventilator en een jaloezieënsysteem worden geregeld. De windsnelheid moet echter wel geleidelijk worden opgevoerd en teruggenomen om te grote drukveranderingen te voorkomen. Het effect van windvlagen (Jungerius et al., 1981) op het zandtransport kan dus niet worden nagebootst. Het zand wordt op houten tableaux in de observatieruimte gelegd. Voor het simuleren van een veldsituatie is een windbaan (strijklengte) nodig van ongeveer 10 à 20 meter (Adriani en Terwindt, 1974; Svasek en Terwindt, 1974), daar de erosie eerst 'op gang' moet komen: in de richting van de windstroom vindt een toename plaats van het aantal springende deeltjes, totdat een soort evenwichtssituatie is bereikt tussen opspringende en weer terugvallende deeltjes en een maximaal zandtransport wordt bereikt (Bagnold, 1960; Belly, 1964). De lengte komt overeen met ongeveer 12 tableaux in de windtunnel (Knottnerus, 1985). Bij de hier te beschrijven experimenten is de 'steady state' waarschijnlijk niet bereikt, omdat maar van één tableau gebruik is gemaakt (waarop 9 à 12 kg zand past), daar in het veld op iedere plaats namelijk 'slechts' 12 à 36 kg zand is bemonsterd. Doordat alle monsters gelijk zijn behandeld, is echter een goede vergelijking van de stuifgevoeligheid mogelijk.

Het zand is eerst 24 uur gedroogd in een stoof op 80°C. Daarna is per monster 1100 gram materiaal (met uitzondering van de referentielokatie Camperduin-Egmond, waarvan maar 840 gram zand beschikbaar was) afgewogen en overgebracht op een houten tableau, dat in het midden van de windtunnel is geplaatst. Bij iedere proef is het zandoppervlak glad gestreken door een lat over de opstaande randen aan de zijkanen van het tableau te schuiven.

De windsnelheid is in 30 seconden geleidelijk opgevoerd van 0 naar 6 Beaufort. Gedurende 2 minuten is een windsnelheid van 6 Beaufort (krachtige wind: 10.8-13.8 m/s) aangehouden (De Rooij-Van der Goes en Jungerius, 1994). Daarna is de windsnelheid weer in 30 seconden teruggebracht. De preciese windsnelheid is op respectievelijk 13 cm en 23 cm boven het oppervlak afgelezen van zogenaamde pitot-tubes. Zo mogelijk is een windsnelheid van 10.64 m/s op 13 cm en van 11.04 m/s op 23 cm hoogte aangehouden. Om de windsnelheid op tien meter hoogte te berekenen, moeten de waarden met ongeveer 1.5 vermenigvuldigd worden, zodat waarden van 7 Beaufort (harde wind: 13.9-17.1 m/s) bereikt zouden worden.

Na de proef is het op de plaat achtergebleven zand teruggewogen. Het direct voor de houten plaat gelegen zand is apart gewogen. De hoeveelheid 'verstoven' (dat wil zeggen in de 3 minuten van het tableau verdwenen) zand is in procenten van het ingewogen zand uitgedrukt.

De experimenten zijn in tweevoud en soms in drievoud uitgevoerd.

De resultaten (zie Bijlage 5) zijn in drie klassen verdeeld:

- het zand is weinig stuifgevoelig (gemiddeld verstuipt 0 tot 45%)
- het zand is matig stuifgevoelig (gemiddeld verstuipt 45 tot 55%)
- het zand is stuifgevoelig (gemiddeld verstuipt 55 tot 100%).

2.1.8. Korrelgrootte-analyse

De korrelgrootte-verdeling van de in het veld genomen monsters is bepaald met behulp van droog zeven. Een hoeveelheid van 100 à 200 gram van elk monster is 24 uur op 70°C. gedroogd en vervolgens 10 minuten geschud boven een negental zeven in het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium. Met uitzondering van de grofste zeef (die gebruikt is om de zand- en de grindfractie van elkaar te scheiden) hebben de zeven steeds een onderling verschil van 0.5 phi en de volgende maaswijdten:

	phi	μm
1 =	-1.00	2000
2 =	0.25	850
3 =	0.75	600
4 =	1.25	425
5 =	1.75	300
6 =	2.25	212
7 =	2.75	150
8 =	3.25	106
9 =	3.75	75.

De gegevens zijn in zeefkrommen uitgezet, waarmee de percentielen d_{10} , d_{50} , d_{60} en d_{90} zijn bepaald (zie paragraaf 2.1.3). Daarnaast is een aantal gewichtsfracties (zandgewicht in een klasse in procenten van het totaal ingewogen monster) berekend. In Bijlage 3 zijn de gegevens opgenomen van de monsters van het zand waar ook windtunnelproeven mee zijn uitgevoerd.

Voor de verwerking is gebruik gemaakt van het programma GAPP (Fay, 1989). Er is met (de eerste vier) momenten gerekend (Fay, 1989). Grafische bepalingen (Trask, 1932; Inman, 1952; Folk en Ward, 1957 in Fay, 1989) zijn veelal niet mogelijk, doordat de fractie $> 600 \mu\text{m}$ teveel materiaal bevat (met name bij schelprijke monsters). De volgende parameters zijn bepaald:

- mediaan d_{50} in μm
- gelijkmatigheidscoëfficiënt $U = d_{60}/d_{10}$ in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
- sortering d_{90}/d_{10} in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
- standaarddeviatie van de korrelgrootte-verdeling σ in phi-eenheden
- gewichtsfractie $< 75 \mu\text{m}$ in procenten
- gewichtsfractie 600-2000 μm in procenten
- gewichtsfractie $> 2000 \mu\text{m}$ in procenten.

Daarnaast is een aantal kwalitatieve parameters bepaald (FAY, 1989).

- Korrelgrootte

Er is onderscheid gemaakt tussen fijn, middel en grof zand.

- Sortering

De helling van de zeefkromme geeft de sortering aan. Er wordt onderscheid gemaakt tussen redelijk goed, goed en zeer goed gesorteerd zand.

- Scheefheid

De scheefheid is de asymmetrie van het histogram of de kromming (afwijking van de normale rechte) van de sommatiecurve (Depuydt, 1972). Er wordt onderscheid gemaakt tussen een zeer kleine scheefheid (d.i. een bijna symmetrische korrelgrootte-verdeling), een fijne staart en een grove staart.

- Kurtosis

De kurtosis is een maat voor de verhouding van de spreiding in de extremen van de verdeling tot de spreiding in het centrale deel van de korrelgrootte-verdeling, dus de 'gepiektheid' van het histogram of het verloop van de uiteinden van de zeefkrommen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen leptokurtic (puntige verdelingskromme), mesokurtic (gewone verdelingskromme) en platykurtic (platte verdelingskromme) zand.

2.1.9. Zandaanvoer

Van een aantal gebieden is een zandbalans opgesteld met als doel te onderzoeken of de zandaanvoer naar de zeereep door zandsuppletie wordt beïnvloed. Het zandbudget in de zeereep wordt bepaald door:

- mariene processen (kustafslag)
- eolische processen (deflatie en depositie)
- kustbeheer (suppletie, egalisatie en herprofilering en invangen van zand met behulp van stuifschermen).

Gepoogd wordt inzicht te krijgen in de eolische processen, met inbegrip van de aanstuiving van suppletiezand.

Van ieder gebied is een zandbudget opgesteld voor de periode 1985 tot 1993 of 1990 tot 1993. Alleen de zeereepkruin is in beschouwing genomen, dat wil zeggen het gebied vanaf het meest landwaartse punt waar in de gehele periode net geen kustafslag is waar te nemen tot aan de over het algemeen weinig dynamische landwaartse helling van de zeereep. Voor ieder punt op de zeereepkruin is het hoogte-verschil voor steeds een periode van ongeveer een jaar berekend. Uit deze gegevens is een gemiddelde zandaanvoer berekend en de minimale zandaanvoer (veelal negatief) en maximale zandaanvoer zijn genoteerd. Tevens is een standaardafwijking bepaald. Per gebied is een aantal (3 tot 13) raaien op deze wijze geanalyseerd. Uit de resultaten kan een gemiddelde zandaanvoer met standaarddeviatie worden berekend en een minimum en een maximum waarde worden bepaald.

Omdat alleen de eolische processen worden bestudeerd, zijn gebieden waar zandsuppletie in de zeereep heeft plaatsgevonden, of waar de zeereep (gedeeltelijk) is geëgaliseerd, niet in de berekening betrokken. Uitzondering hierop vormt het gebied Midden-Ameland, waar in 1990 op de zeereep is gesuppleerd. Het hoogte-verschil tussen het profiel uit 1991 en het profiel uit 1990 is hier ontstaan door het direct opbrengen van zand.

De verzameling hoogteverschillen op de zeereepkruin kan ook beschouwd worden als een steekproef waarnemingen. Het gemiddelde is dan $\bar{x}$ en de standaarddeviatie van de populatie moet met $\sqrt{(n/(n-1))}$ vermenigvuldigd worden om de standaarddeviatie van de steekproef s te krijgen. Met behulp van een t-toets, met:

$$t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / (\sqrt{((n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)) * \sqrt{(1/n_1 + 1/n_2)}})$$

(TILL, 1985) zijn de uitkomsten vergeleken. Er wordt tweezijdig getoetst, met een significantieniveau $\alpha=0.05$. Daarna wordt met behulp van een F-toets, waarin:

$$F = s_1^2 / s_2^2$$

(met $\alpha=0.05$) nagegaan of de varianties van de twee 'steekproeven' ongeveer gelijk zijn, hetgeen een voorwaarde is voor het toepassen van een t-toets. De nul-hypothese H_0 wordt getoetst tegen de alternatieve hypothese H_1 :

- H_0 : de aanstuiving in twee jaren is gelijk ($\mu_1 = \mu_2$)
- H_1 : de aanstuiving is veranderd ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Zelfs als de nul-hypothese wordt verworpen ten gunste van de alternatieve hypothese, kan niet worden gesteld dat zandsuppletie de oorzaak van de verandering in aanstuiving is. De verschillen kunnen bijvoorbeeld ook optreden als gevolg van fluctuaties in het windregime, waardoor niet ieder jaar evenveel aanstuiving kan plaatsvinden, als gevolg van de verticale resolutie van de gegevens in het JARKUS/DONAR-bestand en als gevolg van systematische en andere fouten in het JARKUS-bestand. Hierop kan met deze data-set niet worden getoetst.

Naast de aanstuiving naar de zeereepkruin is tevens de variatie in aanstuiving loodrecht op de kust bestudeerd. Van alle gebieden is een representatieve raai gekozen, waarvoor over een afstand van 300 meter op elk meetpunt het verschil berekend is tussen de hoogteligging in twee jaren met een tussenliggende periode van 3 jaar, eventueel van 2 jaar. Periodes na suppletie en periodes die als referentie kunnen dienen, zijn gescheiden.

2.1.10. Conclusies

Per suppletie zijn verwachtingen uitgesproken over de stuifgevoeligheid van het zand na een analyse van de gegevens van onderzoek in het wingebied (paragraaf 2.1.3). De verwachtingen zijn gebaseerd op relaties tussen met name materiaaleigenschappen en stuifgevoeligheid die bekend zijn uit literatuur (paragraaf 2.3). Zij worden ook per suppletie getoetst.

Het onderzoek ter plaatse van de suppletie (paragraaf 2.1.6) is van belang voor de toetsing. Het zand van de winlokatie is gemengd tijdens het winnen, in enkele gevallen vinden na winning bewuste kwaliteitsverbeteringen plaats en ook tijdens de suppletiewerkzaamheden kunnen de eigenschappen veranderd zijn (bijvoorbeeld door verschillen in bezinksnelheid). Door het bemonsterde zand in het laboratorium te analyseren en te vergelijken met de gegevens uit het wingebied wordt nagegaan in hoeverre het suppletiezand afwijkt van het zand in het wingebied.

Uit de vergelijking van de uitkomsten van de windtunnelproeven met de korrelgrootte-analyses volgt welke in het laboratorium bepaalde zandeigenschappen bepalend zijn voor de stuifgevoeligheid van zand. De twee vergelijkingen maken het mogelijk te bepalen in hoeverre de verwachtingen uitkomen.

Daarnaast wordt door het analyseren van de zandaanvoer als functie van de tijd nagegaan of zandsuppleties invloed hebben op het stuifgedrag en of de stuifgevoeligheid van het zand bepalend is voor eventuele veranderingen.

In de algemene conclusies (paragraaf 2.5) worden de resultaten van alle suppleties op een rijtje gezet. Er wordt nagegaan in hoeverre de materiaaleigenschappen op de winlokatie voorspeld kunnen worden, in hoeverre de materiaaleigenschappen bepalend zijn voor de stuifgevoeligheid en in hoeverre de stuifgevoeligheid bepalend is voor het stuifgedrag van zandsuppleties.

2.2. Literatuurstudie

Verstuiving is het transport van zand door de wind. Een deeltje komt in beweging als de kracht die de wind erop uitoefent groter is dan de krachten die het op zijn plaats houden, of door botsing met een al bewegend deeltje. Dit kan op drie manieren: kruipend, salterend en in suspensie

(Bagnold, 1960). Saltatie, het in series van sprongen transporteren van materiaal, is het belangrijkste proces. Meer dan de helft van de korrels beweegt in de vorm van saltatie (Chepil, 1945). Kruipend (door schuiven en rollen) wordt 20% van de deeltjes getransporteerd. In normaal duinzand wordt minder dan 5% van het materiaal in suspensie (zwevend) vervoerd, omdat de dichtheid van het duinzand substantieel groter is dan die van de lucht (Bagnold, 1960). Uitzondering hierop is het proces van jettatie (Arens, 1994), dat in deze paragraaf nader beschreven zal worden. Een groot aantal factoren bepaalt bij welke windsnelheid het zand wordt opgenomen en hoeveel materiaal er wordt getransporteerd. Sedimentatie vindt plaats als de windsnelheid afneemt, bijvoorbeeld als gevolg van reliëf of vegetatie. In deze paragraaf komen de factoren aan de orde die invloed kunnen hebben op het transport van zand van het strand naar de zeereep.

Beschikbaarheid van zand

De beschikbaarheid van zand is een voorwaarde voor zandtransport van het strand naar de zeereep. Op de korte termijn (tot ongeveer tien jaar) wordt de hoeveelheid zand bepaald door kleine veranderingen in hydraulische en meteorologische omstandigheden die verantwoordelijk zijn voor het transport van zand van strand en zeebodem, door verplaatsing van brandingsruggen en door dynamische evenwichten. Door zand te suppleren, kan de hoeveelheid beschikbaar zand tijdelijk worden gewijzigd (Stolk, 1989).

Atmosferische parameters en bodemvocht

- Windsnelheid

Het transport van beschikbaar zand over het strand is in hoge mate afhankelijk van de windsnelheid. Uit metingen bij Noordwijkerhout is gebleken dat bij een windkracht kleiner dan 3 Beaufort geen zandtransport meer optreedt (Adriani en Terwindt, 1974; Svasek en Terwindt, 1974). Zandtransport blijkt vooral te worden geïnitieerd door windvlagen (Jungerius et al., 1981). Als op het strand zand wordt getransporteerd, betekent dit echter nog niet dat zand aan de zeereep ten goede komt. Bij een lage windsnelheid stuift wel zand naar de zeereep, maar accumuleert het reeds bij de duinvoet. Pas bij hoge windsnelheden kan het zand verder over de zeereep worden getransporteerd (Arens, 1994).

- Windrichting

De windrichting heeft invloed op het zandtransport (Svasek en Terwindt, 1974), doordat zij de strijklengte bepaalt, waarover de wind zand kan opnemen. De wind heeft, afhankelijk van de windkracht, een bepaalde afstand nodig voordat hij met zand verzadigd is. Wanneer met krachtige wind een aanzienlijke hoeveelheid zand wordt getransporteerd, is deze ongeveer 20 meter in de richting van de wind (Adriani en Terwindt, 1974). Vooral een aanlandige wind die loodrecht op de zeereep staat, hoeft niet met zand verzadigd te zijn, wanneer de zeereep wordt bereikt. Bij wind die parallel aan de zeereep waait, wordt noch zand opgenomen, noch zand afgezet, omdat de wind reeds verzadigd is met zand. De geografische oriëntatie van de zeereep is bepalend voor de effectiviteit van de wind, die gedefinieerd is als de ratio tussen aanlandige en aflandige winden (Arens, 1994).

- Neerslag

Vooraf tijdens dagen met korte, hevige buien in combinatie met harde wind kan het zandtransport hoog zijn. Waarschijnlijk vindt met name impulsoverdracht van de regendruppels op de zandkorrels plaats, zodat het zand door de wind kan worden opgenomen. Als de regen echter aanhoudt, neemt het zandtransport zeer sterk af ten gevolge van een hoge bodemvochtigheid

(Arens, 1994).

- Vochtigheid

De luchtvochtigheid verhoogt de kritische windsnelheid die nodig is voor zandtransport en kan de hoeveelheid getransporteerd zand doen verminderen (Belly, 1964). De luchtvochtigheid is verder indirect van invloed op het zandtransport, doordat zij, samen met de temperatuur en de hoogte, invloed heeft op de luchtdichtheid (Sherman en Hotta, 1990). De bodemvochtigheid beïnvloedt de grootte van het zandtransport op eenzelfde wijze. Belly (1964) wees op de interactie tussen luchtvochtigheid en bodemvochtgehalte. Onder invloed van een fluctuerende luchtvochtigheid kan de vochtigheid van het toplaagje van de grond mee veranderen. Een nat of vochtig oppervlak kan vocht afstaan aan de lucht, waardoor vochtbindingen in de grond verminderen of verdwijnen (Knottnerus, 1985). Een effect op de grootte van het zandtransport is vooral merkbaar bij lage windsnelheden (Svasek en Terwindt, 1974; Arens, 1994). De invloed van materiaaleigenschappen op het vochtvasthoudend vermogen van het oppervlak wordt elders in deze paragraaf beschreven.

Materiaaleigenschappen

De materiaaleigenschappen van het zand bepalen de stuifgevoeligheid ervan. Diverse auteurs hebben reeds gewezen op de rol van de erodeerbaarheid van het oppervlak voor het zandtransport.

- Korrelgrootte

In de bestaande zandtransportformules wordt veel aandacht besteed aan de korrelgrootte (Bagnold, 1960; Horikawa et al., 1986). Kwartskorrels met een diameter van ongeveer 80 - 100 μm worden het makkelijkst getransporteerd: kleinere deeltjes hebben voor verplaatsing een grotere windsnelheid nodig door cohesiekrachten tussen de deeltjes en grotere deeltjes bieden meer weerstand door een grotere ratio massa/oppervlak (Bagnold, 1960; Smalley, 1970). Als de makkelijk verstuijfbare deeltjes eenmaal salteren, komen ook deeltjes met andere korrelgrootten door botsing in beweging (Nickling, 1988).

De zandkorrels met een diameter tussen 100 en 500 μm worden in saltatie getransporteerd (Chepil, 1945), grotere korrels zijn te zwaar om door de lucht te worden getransporteerd en schuiven en rollen over het oppervlak. Zandkorrels die groter zijn dan 1000 μm worden bij normale windsnelheden niet meegenomen (Chepil, 1945). Over het algemeen geldt dat de korrelgrootte landinwaarts afneemt.

- Korrelgrootte-verdeling

Bagnold (1960) vond dat het zandtransport van 'normaal duinzand' hoger is dan dat van uniform zand: hoe slechter het zand gesorteerd is, hoe beter het stuift. Over het algemeen geldt dat zeezand slechter is gesorteerd dan strandzand en strandzand slechter dan duinzand (King, 1972). Arens (1994) vond het tegengestelde bij het testen van de effectiviteit van zandvangsters: van slecht gesorteerd zand is minder verstoven dan van goed gesorteerd zand.

Dit hangt mogelijk samen met de geschiktheid voor compactie van los materiaal. Er geldt dat de geschiktheid voor compactie toeneemt en de stuifgevoeligheid daarentegen afneemt, naarmate het zand slechter gesorteerd is; de ruimte tussen grote zandkorrels kan worden opgevuld door kleinere. Vooral bimodaal zand (zand met een tweetoppige korrelgrootte-verdeling) is geschikt voor compactie (Nickling, 1988). Draga (1983) verklaarde het nauwelijks stuiven van een zandsuppletie op Westerland (Sylt) in Duitsland door compactie. Het gebruik van zware machines tijdens suppletiewerken kan de pakking verdichten (Draga, 1983).

- Korrelvorm en -afrondding

Uit experimenteel onderzoek is gebleken dat hoekige korrels eerder worden meegenomen bij lage windsnelheden, daar zij een relatief groot oppervlak hebben waarop de wind kan aangrijpen, dat bij hoge windsnelheden afgeronde korrels juist eerder worden meegenomen en dat bij zeer hoge windsnelheden geen vormselectie meer optreedt (Williams, 1964; Beemster, 1986). Ook Eisma (1965 in Reineck en Singh, 1980) beschrijft dat hoekige korrels vooral bijdragen tot duinvorming bij lage windsnelheden en dat afgeronde korrels belangrijk zijn voor duinvorming tijdens storm. Een voorwaarde voor het ontstaan van verschillen in afronding tussen strand- en duinzand is echter wel dat de zandkorrels van het strand een grote variatie in afronding vertonen (King, 1972). Olij (1993) vond geen significante verschillen in afronding van zandkorrels van (gesuppleerd) strand en zeereep: de meeste korrels waren afgerond hoekig of hoekig afgerond.

- Klei- en siltgehalte

Zeer fijne deeltjes worden moeilijk door de wind opgenomen ten gevolge van de grote bindingskrachten (hoofdzakelijk cohesie). Doordat slib langzamer bezinkt dan zand, kan na het opbrengen van een suppletie een slibrijke bovenlaag ontstaan, die de verstuiwing verhindert. Zelfs een kleine hoeveelheid klei (fractie $< 2 \mu\text{m}$) kan de korstvorming bevorderen (Chepil, 1945). Daarnaast spelen kleideeltjes een belangrijke rol bij aggregaatvorming; met silt gevormde aggregaten zijn minder stabiel en vallen bij verdroging weer uiteen.

- Hoeveelheid schelp(fragment)en, grind en stenen

Weinig erodeerbare deeltjes, zoals schelpfragmenten, grind en stenen kunnen achterblijven bij deflatie (Carter, 1976; Carter en Rihan, 1978) en kunnen uiteindelijk een aaneengesloten dek aan het oppervlak vormen (een 'desert pavement') en het onderliggende zand tegen verstuiwing beschermen (Chepil, 1945). Als dit proces niet door de branding wordt verstoord, kan de verstuiwing geheel tot stilstand komen.

Lyles (1974 en 1977, in Nickling en Davidson-Arnott, 1990) toonde aan dat bij een grotere oppervlakte-ruwheid een groter gedeelte van de schuifspanning voor de weinig erodeerbare deeltjes wordt 'verbruikt', waardoor er minder schuifspanning over blijft voor de fijnere deeltjes. Afhankelijk van de dichtheid van de grove deeltjes, die verandert in de tijd, wordt de erosie versneld (als gevolg van turbulentie) of vertraagd (als gevolg van een hogere kritische windsnelheid).

- Mineralogische samenstelling

Zeezanden kunnen een andere mineralogische samenstelling hebben dan strand- en duinzanden. De verstuiwingskarakteristiek zal dan ook anders zijn: zwaardere korrels moeten voor beweging een grotere drempelwaarde overschrijden dan lichtere deeltjes. Willetts (1983) vond een variatie van minder dan 1% in het soortelijk gewicht van in strand- en duinzand voorkomende mineralen. Langs de Nederlandse kust bestaat het zand voornamelijk uit kwartskorrels en heeft het zand een specifieke dichtheid van ongeveer 2.65. Depuydt (1972) heeft een groot aantal monsters van de Frans-Belgische kust onderzocht op zware mineralen, met name magnetiet (specifieke dichtheid is 5.18). Hij vond dat het duingebied gemiddeld een groter gewicht aan zware mineralen bezit dan het strand, waarvoor het selectief transportvermogen van het zand (golftransport versus eolisch transport) verantwoordelijk is.

- (Oplosbare) zouten, ijzerverbindingen etc.

Oplosbare zouten houden de individuele deeltjes bij elkaar, en verhogen de drempelwaarde die overschreden moet worden voor zandtransport (Nickling en Ecclestone, 1981). Het effect van zouten is het grootst in fijn zand, vanwege het relatief grote contact-oppervlak (Nickling, 1984). Door verkitting kan aan het oppervlak een korst ontstaan. Zelfs een kleine hoeveelheid calcium- (kalk) of magnesiumcarbonaat kan de korstvorming bevorderen. Olij (1993) vond geen verschil

in kalkgehalte tussen suppletiezand en zeereepzand, mede door de grote variatie van het kalkgehalte op een lokatie. Rond de kwartskorrels kan ook een huidje van ijzeroxide zitten. Naast het feit dat de korrels hierdoor zwaarder zijn, drogen ze na bevochtiging moeilijker, zodat ze makkelijker aan elkaar kleven en minder stuifgevoelig zijn (Westhoff en Van Oosten, 1991). Ook aluminiumverbindingen kunnen een rol spelen bij de verkitting.

Het kalkgehalte is ook direct van invloed op de vegetatie. Van nature is het gebied benoorden Bergen kalkarm en het gebied bezuiden Bergen kalkrijk. Dit komt tot uitdrukking in een verschil in vegetatiesamenstelling in beide gebieden. Voor het behoud van de vegetatie is het daarom essentieel dat in het kalkarme district weinig of geen kalktoevoer plaatsvindt.

- **Organische stof**

Verkitting kan ook optreden door algen en organische stof (Pluis, 1993).

- **Bodemvochtgehalte**

Er is reeds aandacht besteed aan het effect van de vochtcondities op de hoeveelheid zand die kan verstuiven. Korrelgrootte- en poriëngrootte-verdeling zijn van invloed op het vochtvasthoudend vermogen van het materiaal. Klei is ook daarom minder stuifgevoelig dan zand.

Topografie en ruwheid

- **Geometrie van het strand**

Zoals al aan de orde is gekomen, is bij een bepaalde windsterkte een bepaalde strijklengte nodig voor evenwichtszandtransport. Naast windrichting kan ook strandbreedte (en met name de breedte van het droge strand) hierin een beperkende rol spelen (Nickling en Davidson-Arnott, 1990; Kroon en Hoekstra, 1990; Nordstrom en Jackson, 1993). De helling van het strand geeft in een aantal gevallen aan of er overwegend erosie of depositie plaatsvindt, maar kan ook direct invloed uitoefenen op de grootte van het zandtransport (Sherman en Bauer, 1993).

- **Geometrie van de zeereep**

De windsnelheid die nodig is voor transport naar de zeereep hangt af van de topografie, met name van de hoogte van de zeereep, maar ook van de hellingshoek van de zeezijde van de zeereep. Er lijkt een kritische hoogte voor de zeereep te bestaan. Wanneer een begroeide zeereep te hoog is ten opzichte van de ligging van het strand, wordt het zand bij de duinvoet afgezet en wordt er geen materiaal meer naar de zeereep vervoerd (Arens, 1994).

- **Reliëfvergangen en vegetatie**

Het patroon van erosie en sedimentatie in de zeereep is sterk afhankelijk van de vegetatiebedekking en de topografie (Sarre, 1989). Salterend zand dat tegen de zeereep opstuift, komt voor het grootste deel tot stilstand in de vegetatie. Door de stuwing van de lucht tegen de zeereep ontstaat een verticale wind, waardoor zandkorrels worden opgetild en over de zeereep in suspensie kunnen worden getransporteerd (jettatie). Het zandtransport neemt landwaarts af door toename van de vegetatiebedekking (Arens, 1994).

2.3. Verwachtingen

De in de literatuur gevonden parameters die van invloed zijn op het zandtransport kunnen worden gesplitst in factoren die niet door zandsuppletie worden aangestuurd, zoals de meeste atmosferische factoren, en parameters die na zandsuppletie (kunnen) worden gewijzigd. Voor de laatste groep zijn hypothesen opgesteld die ten dele door middel van dit onderzoek getoetst zullen worden. De nadruk wordt in dit onderzoek gelegd op veranderingen van de materiaaleigenschappen als gevolg van zandsuppletie.

Materiaaleigenschappen

Met zandsuppletie wordt ingegrepen op de materiaaleigenschappen van het strandzand (Olij, 1993). De materiaaleigenschappen kunnen elkaars werking versterken of teniet doen en bepalen gezamenlijk de stuifgevoeligheid. Eisma (1968) stelt bijvoorbeeld dat de aanwezigheid van schelpen in zee toeneemt met het slibgehalte, daar dit de hoeveelheid beschikbaar voedsel voor de schelpdieren bepaalt. Voor elk van de genoemde materiaaleigenschappen is op basis van de literatuurstudie een verwachting ten aanzien van de stuifgevoeligheid aangegeven. De hypothesen staan in volgorde van belangrijkheid, d.i. naar het verwachte aandeel van de materiaaleigenschap op de actuele verstuivingsgevoeligheid van zand en het stuifgedrag.

- **Hoeveelheid schelp(fragment)en, grind en stenen**
De aanwezigheid van schelp(fragment)en is het meest bepalend voor de stuifgevoeligheid van suppletiezand in het veld. Grind en stenen lijken niet in die mate voor te komen dat de verstuiving van zand er sterk door wordt verminderd.
- **Korrelgrootte**
Zand zal minder verstuiven naarmate de mediaan groter is, vooropgesteld dat het zand grover is dan 100 μm . Verwacht wordt dat de invloed van de korrelgrootte op de grootte van het zandtransport groot is.
- **Klei en silt**
Klei en silt hebben een negatieve invloed op de stuifgevoeligheid. De verwachting is dat vooral klei een belangrijke rol speelt bij de stuifgevoeligheid van suppletiezand.
- **Korrelgrootte-verdeling**
Zand stuift minder naarmate het beter geschikt is voor compactie, d.i. slechter gesorteerd is. Op grond van de literatuur kan echter ook een tegengesteld effect worden verwacht.
- **(Oplosbare) zouten, ijzerverbindingen etc.**
Naast enige effecten op de grootte van het zandtransport als gevolg van verkitting, kan de vegetatie in de zeereep worden beïnvloed door de toevoer van kalk naar de zeereep.
- **Organische stof**
Organische stof zal alleen een negatieve invloed op het zandtransport hebben, als er veel van aanwezig is.
- **Korrelvorm en -afronding**
De korrelvorm en -afronding hebben zeer weinig of geen invloed op de grootte van het zandtransport.

- Mineralogische samenstelling
Het verschil tussen de mineralogische samenstelling van origineel zand en suppletiezand is over het algemeen klein.
- Bodemvochtgehalte
Omdat juist van suppletiezand verwacht wordt dat het heterogener van samenstelling is dan origineel strandzand, en omdat het een aanzienlijke hoeveelheid klei, silt en organische stof kan bevatten, zal de verstuiwing extra beperkt kunnen worden in deze gevallen. Indien als gevolg van suppletie de hoogte en breedte van het strand toenemen, worden de bodemvochtcondities juist gunstiger voor verstuiwing.

De hypothesen worden met behulp van gegevens van materiaaleigenschappen van zand in het wingebied en in het veld, veldobservaties en windtunnelproeven getoetst.

Overige factoren die de verstuiwing bepalen

De aanstuiving kan met name op de volgende drie manieren worden gewijzigd als gevolg van een zandsuppletie.

- Beschikbaarheid van zand
De verwachting is dat door zandsuppletie de beschikbaarheid van zand wordt vergroot, hetgeen een positief effect heeft op het potentieel zandtransport.
- Atmosferische parameters en bodemvocht
Doordat met een strandsuppletie wordt ingegrepen op de hoogteligging van het strand ten opzichte van het zeewaterniveau, kunnen bodemvochtcondities na suppletie gunstiger worden voor zandtransport.
- Topografie en ruwheid
De verwachting is dat plaats en vorm van een zandsuppletie het stuifgedrag beïnvloeden, doordat ook zij bepalen hoeveel zand aan de wind wordt blootgesteld en doordat zij het windveld en daarmee het sedimentatiepatroon kunnen beïnvloeden. Met zandsuppletie wordt tevens ingegrepen op de breedte van het strand. De strandbreedte zal een functie zijn van de plaats waar gesuppleerd wordt, de hoeveelheid aangebracht zand (zie ook onder beschikbaarheid van zand) en de mate van erosie en zal verband houden met de hoeveelheid naar de zeereep getransporteerd zand.

Toetsing van de hypothesen vindt plaats met behulp van de gegevens uit het JARKUS-bestand, waaruit de aanstuiving wordt berekend. Een vergroting van de hoeveelheid aangestoven zand na suppletie van weinig stuifgevoelig zand duidt op het belang van bovenstaande factoren. Een studie naar de veranderingen in het windveld ten gevolge van zandsuppleties valt buiten het kader van dit onderzoek.

2.4. Verwachtingen en resultaten per suppletie

2.4.1. Ameland: Midden-Ameland

Doel en plaats van de suppleties

Op Midden-Ameland is driemaal een suppletie uitgevoerd: in 1980, in 1990 en in 1992. In 1980 is zand tegen het duin gesuppleerd. In 1990 is opnieuw gesuppleerd om de stormschade te herstellen. Het zand voor de suppletie is gewonnen met behulp van een sleeppopperzuiger en landwaarts op de zeebodem 'geklapt', waarna het met behulp van een cutterzuiger is opgezogen en via een pijpleidingstelsel is doorgepompt naar het strand. Tussen RSP 13.80 en 15.20 is de zeereep tot het grensprofiel versterkt door droog grondverzet van het suppletiezand en het oorspronkelijke zand. Tijdens de werkzaamheden voor de suppletie in 1992 is eenzelfde procedure gevolgd als in 1990. Tussen RSP 11.50 en 19.60 is een strandsuppletie aangebracht, tussen RSP 11.50 en 12.80 is ook het duinmassief versterkt.

Analyse van gegevens van de wingebieden

De winlokatie voor de suppletie in 1980 lag in de luwte van de zandplaat het Bornrif, circa 2 km uit de kust ter hoogte van RSP 3.00 en 4.00. Het suppletiezand was redelijk fijn (mediaan van 180 μm), terwijl op het strand voorafgaand aan de suppletie zand aanwezig was met een mediaan van 159-168 μm (Roelse en Hillen, 1993). Er is geen onderzoek op de winlokatie verricht.

Over het wingebied dat voor de suppleties van 1990 en 1992 is gebruikt (Noordzee benoorden de twintig meter dieptelijn, tot twee meter beneden de zeebodem) is meer bekend. In opdracht van de Directie Noordzee is een aantal boringen door de Rijks Geologische Dienst uitgevoerd (Rijkswaterstaat, Friesland, Waddeneilanden, 1990). Slechts één hiervan ligt echter in het uiteindelijk gekozen wingebied en één ligt er vlakbij. De gegevens van deze twee boringen en de boringen in het aangrenzende gebied zijn geanalyseerd (zie ook Bijlage 2: 2a, 2h en 2j).

- **Korrelgrootte**

De d_{50} (mediaan bepaald met behulp van de vergelijkingsmicroscop) van de twee boringen is gemiddeld 235 μm (matig grof zand), die van alle, ook de in het aangrenzende gebied genomen boorkernen is gemiddeld 216 μm . Matig grof is ook de klasse waarin de hoogste waarde voor de mediaan valt: er zijn geen extreem grofzandige monsters. Het materiaal is echter wel grover dan het oorspronkelijke strandzand en grover dan het uit het Bornrif afkomstige suppletiezand.

Door de Directie Friesland van Rijkswaterstaat zijn op het strand van Ameland in 1990 monsters genomen, omdat het vermoeden bestond dat het zand niet alleen uit het 'geklapte' zand (d.i. uit de winlokatie) bestond, maar dat ook zand eronder (d.i. uit de vooroever) is opgezogen en gesuppleerd. Uit een analyse van strandzand blijkt dat het zand uit de vooroever fijnkorreliger is dan het zand uit het zandwingebied. Tijdens de suppletiewerkzaamheden in 1992 is geen materiaal uit de vooroever gezogen.

- **Korrelgrootte-verdeling**

Alle monsters hebben een matige spreiding.

- **Silt en klei**

In één boorprofiel in het wingebied zijn plaatselijk enkele klei-insluitels in een zandlaag gevonden. In het andere boorprofiel zijn op een diepte van meer dan twee meter siltinclusies gevonden.

- Grind en stenen
In het gehele gebied is tweemaal een grindhoudende zandlaag aangetroffen op een diepte van meer dan twee meter.
- Organische stof
Er is geen organische stof in de boorprofielen waargenomen.
- Schelpen
In het gebied komen veel schelprijke lagen voor, waarin niet alleen schelpgruis maar ook vaak hele schelpen voorkomen.
- Kalk
Het materiaal is over het algemeen matig kalkhoudend.

Verwachtingen

Uit de resultaten van de analyse van het zand uit het wingebied volgen de onderstaande verwachtingen.

- De mediaan duidt op een redelijk hoge stuifgevoeligheid.
- De matige spreiding duidt op een matige stuifgevoeligheid.
- Van klei en silt worden weinig problemen verwacht, hoewel er plaatselijk wel tegen winderosie resistente lagen kunnen ontstaan.
- Grind speelt geen rol bij de verstuiwing.
- Organische stof speelt geen rol bij de verstuiwing.
- Er worden vloertjes van schelp(fragment)en gevormd.
- Gezien het kalkarme karakter van de zeereep op de Waddeneilanden lijken verrijking met kalk en effecten daarvan op de vegetatie in de zeereep niet uitgesloten.

Verwacht wordt matig stuifgevoelig zand, waarvan de verstuiwing voornamelijk wordt beperkt door schelpen.

Veldwerk

De suppletie van 1990 is bij RSP 15.00 (Buren) duidelijk aanwezig. Er is tot op de top van de zeereep gesuppleerd. Voor de zeereep zijn stuifschermen dwars geplaatst. Hier vindt accumulatie plaats, maar verstuift ook zand naar de zeereep. Er ligt een niet gesloten dek van fijne schelpfragmenten. Aan de steile zeezijde van de zeereep bevindt zich een nauwelijks onderbroken schelpenvloer van hele schelpen of grote fragmenten ervan. Hier is een volume-monster genomen voor de windtunnelproeven.

Op de top, waar helm is aangeplant, zijn nauwelijks schelpen aanwezig en aan de landzijde van de top heeft enige accumulatie plaatsgevonden van suppletiezand, met veel schelpgruis aan het oppervlak.

Tussen RSP 12.00 en 12.20 (bij Nes) is de buitenduinrandsuppletie uit 1992 goed zichtbaar. Ook hier is een groot volume zand tegen de zeereep gelegd. De situatie is vergelijkbaar met die bij RSP 15.00. Op de top is veel schelpgruis aanwezig, er zijn enkele klei-concreties en op een enkele plaats is organische stof aangetroffen. Het volume-monster is aan de zeezijde van de zeereep bij RSP 12.20 genomen.

Er zijn referentiemonsters genomen bij Hollum (RSP 3.20, Bornrif) en bij Ballum (RSP 8.40 en

8.60). Bij RSP 8.40 is een groot strandmonster genomen voor de windtunnelproeven. Achter de stuifschermen en op de zeereepkruin vindt sterke accumulatie plaats. Er zijn in het referentiegebied geen schelpenvloertjes gevonden.

Windtunnelproeven

Windtunnelproeven (Bijlage 5) geven grote verschillen tussen niet gesuppleerd en gesuppleerd zand.

- **Referentie**

Het zand is licht van kleur (grijsbruin). Het bevat vrij weinig schelpen. Na het windtunnel-experiment zijn toch nog enkele fijne schelpfragmenten aan het oppervlak achtergebleven. Het zand verstuift snel; na de proef is een groot gedeelte van de bodem van de plaat zichtbaar. Gemiddeld is 62% van het materiaal verstoven.

- **Suppletie 1990**

Het zand uit 1990 is grijsbruin en bevat veel schelpen. Tijdens de windtunnelexperimenten is gemiddeld 12% van het materiaal verstoven. Aan het oppervlak heeft zich tijdens het experiment een schelpenvloer gevormd, waardoor verdere verstuiving is verhinderd.

- **Suppletie 1992**

Het zand uit 1992 is donkergrijs. Het is net als het zand dat in 1990 is opgebracht schelprijk. Er heeft zich weer een schelpenvloer gevormd, maar de schelpen en schelpfragmenten zijn fijner, zodat iets meer materiaal is verstoven. Er zijn windtunnelproeven uitgevoerd met drie monsters, waarvan er één minder schelpen bevat. Dit komt tot uitdrukking in de resultaten: van het eerste monster is 24% verstoven, van het tweede en derde monster respectievelijk 13 en 14%.

Korrelgrootte-analyse

Uit de korrelgrootte-analyse (zie Figuur 3 en Bijlage 3) blijkt dat de mediaan van het suppletiezand niet veel grover is dan die van het referentiezand.

Het suppletiezand is slecht gesorteerd: d_{90}/d_{10} van de monsters A-SUP90 en A-SUP92 is zeer hoog, mede door het hoge schelpgehalte. De gelijkmatigheidscoëfficiënt $U = d_{60}/d_{10}$ van het gesuppleerde zand is vrij groot: het suppletiezand is beter geschikt voor compactie dan het originele zand, hetgeen op een lagere stuifgevoeligheid duidt.

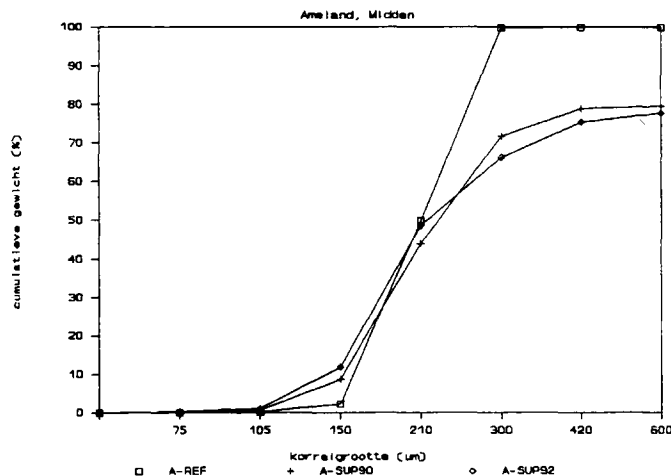
In het suppletiezand is vrij veel fijn materiaal ($< 75 \mu\text{m}$) gevonden, vooral in het zand dat in 1992 is opgebracht. Het referentiezand bevat nauwelijks deeltjes $< 75 \mu\text{m}$.

De korrelgrootte-analyse wijst ook uit dat het suppletiezand uit 1992 veel deeltjes bevat in de fractie 600-2000 μm , terwijl het suppletiezand uit 1990 een hoger gewichtspercentage in de fractie $> 2000 \mu\text{m}$ heeft. Het gehalte $> 600 \mu\text{m}$ is bij het suppletiezand uit 1992 zelfs hoger, terwijl er meer is verstoven. De fractie $> 600 \mu\text{m}$ bestaat geheel uit schelpen en schelpfragmenten. Er is geen grind in de monsters aangetroffen.

Sortering door de wind

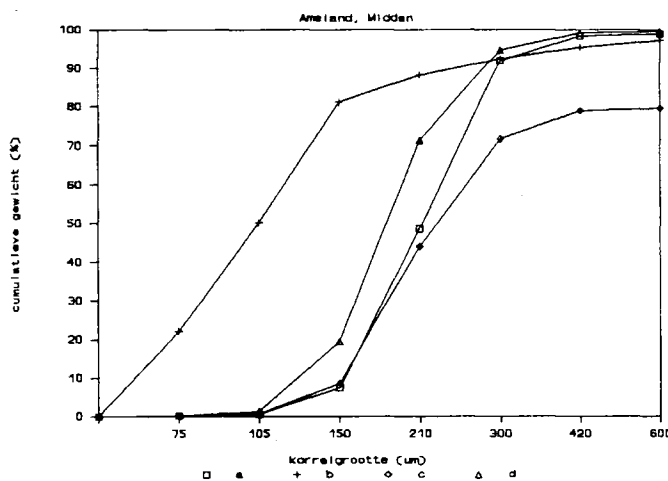
In Figuur 4 zijn de cumulatieve curven uitgezet van vier monsters van zand genomen langs een raai ter hoogte van RSP 15.00 (suppletie 1990) en RSP 12.00 (suppletie 1992). Er is zand bemonsterd dat niet of nauwelijks is bewerkt door wind of water (van de suppletie uit 1990), er is een monster genomen in een kleilaag in het suppletiezand van 1992 en er zijn monsters genomen van respectievelijk het zand uit 1990 dat na verstuiving achterblijft (het schelpenvloertje) en het zand dat na verstuiving op de duinfrontsuppletie is geaccumuleerd.

Het geaccumuleerde zand is veel fijner dan het nauwelijks door de wind bewerkte suppletiezand en het zand dat achterblijft na verstuiving. Monsters van zowel oorspronkelijk suppletiezand als zand dat geaccumuleerd is, bevatten weinig materiaal grover dan 600 μm . De schelpenvloer en het oorspronkelijk suppletiezand bevatten cumulatief evenveel materiaal < 150 μm .



Figuur 3. Korrelgrootte-verdeling van zand van Midden-Ameland:

- referentie, strand, RSP 8.4 (A-REF)
- suppletie 1990, RSP 15.0 (A-SUP90)
- suppletie 1992, RSP 12.2 (A-SUP92).



Figuur 4. Variatie in korrelgrootte-verdeling en korrelgrootte-verdeling na sortering door de wind in twee suppletie-gebieden op Midden-Ameland (RSP 15.00 en RSP 12.00):

- a. suppletie-zand uit 1990
- b. kleilaag in suppletie-zand uit 1992
- c. schelpenvloer na verstuiving van het suppletie-zand uit 1990
- d. accumulatie van verstoven suppletie-zand uit 1990.

Zandaanvoer

In Bijlagen 6 en 7 staan de resultaten van de berekeningen van de zandaanvoer op Ameland.

- Bornrif, referentie
Ter hoogte van RSP 3.40 is de zeereep tot bijna 70 cm in 3 jaar gegroeid in de periode 1990-1993. De ophoging is het grootst op en direct achter de top van de zeereep.
Over het gehele gebied genomen vindt op de zeereepkruin maar een matige aanstuiving plaats: gemiddeld per jaar 10 cm of minder, maximaal echter 91 cm/j, zoals ook in het suppletiegebied op Midden-Ameland. Depositie vindt met name op en direct achter de top plaats en nauwelijks op de landhelling. In het westen van het gebied vindt enige aangroei tegen het duinfront plaats.
- Midden, referentie
De aanstuiving is ter hoogte van RSP 8.40 hoger dan bij RSP 3.40 bij het Bornrif. In de periode 1990-1993 is de meest zeewaartse top van de zeereep sterk opgehoogd (met meer dan 125 cm in drie jaar, over ongeveer 50 meter zeereep). Landwaarts neemt de aanstuiving af (0 tot 50 cm in drie jaar) tot een verwaarloosbare hoeveelheid op de landhelling.
Ook het gemiddelde van het gehele gebied is hoog: 17 tot 42 cm/j. Maximaal is 113 cm/j aanstuiving gemeten.
- Midden, suppletie
Ter hoogte van RSP 13.40 lijkt er meer aanstuiving geweest te zijn na suppletie. De aanstuiving is vrij gering. Maximaal is er in twee jaar (periode 1991-1993) 50 cm bijgekomen. Over het algemeen is de aanstuiving minder dan 25 cm in twee jaar, in de periode 1988-1990 is de aanzanding zelfs netto negatief.
In 1980 is een suppletie tegen het duinfront van de zeereep aangebracht. Tot 1990 vindt afslag plaats, die ook na de suppletie in 1990 voortgaat. In de jaren voor suppletie is de aanstuiving gemiddeld maximaal 6 cm/j, en heeft een maximaal gemeten waarde van 34 cm/j in de periode 1988-1989. Let wel dat gegevens van 1986 ontbreken: de waarden van 1985-1987 zijn uitgedrukt in cm per twee jaar. Na duinsuppletie in 1990 is er sterke depositie, gemiddeld 0-25 cm, maar maximaal 75 cm (1991-1992). De periode 1990-1991 is een extreem hoge waarde gemeten, veroorzaakt door directe suppletie in de zeereep. Eolisch transport is wel verantwoordelijk voor de hoge waarde in de periode erna (1991-1992): op de top (vooral vrij dicht bij de landhelling, zoals ook in het veld is waargenomen) is toen veel zand geaccumuleerd (gemiddeld 22 cm/j, maximaal 91 cm/j). Na drie jaar aanstuiving van suppletiezand is de aanstuiving tot 0 gereduceerd, mogelijk als gevolg van het ontstaan van schelpenvloertjes.

Uit statistische analyse blijkt het volgende.

- Twee jaar na suppletie (N=2) is de zandaanvoer groter dan in andere jaren. Vergeleken is met name als referentie de periode 1987-1988, omdat de variantie in andere jaren vaak significant lager is dan in de periode na twee jaar verstuiving.
- De zandaanvoer na drie jaar verstuiving van suppletiezand (N=3) is significant lager dan de aanvoer na twee jaar verstuiving (N=2).

Conclusies

De verwachtingen zijn getoetst aan de hand van de resultaten van korrelgrootte-analyse, windtunnelproeven en analyse van het JARKUS/DONAR-bestand.

De verwachte materiaaleigenschappen zijn vergeleken met de in het veld bepaalde zandsamenstelling.

- De mediaan van het suppletiezand is inderdaad vrij laag.
- Het zand is slecht gesorteerd en het is redelijk geschikt voor compactie. Dit komt overeen met de verwachtingen.
- Het materiaal bevat in tegenstelling tot de verwachting fijn materiaal. Het effect hiervan op de verstuiwing is niet geheel duidelijk.
- Er is inderdaad geen grind aangetroffen.
- Organische stof speelt inderdaad geen rol bij de verstuiwing.
- Schelp(fragment)en zorgen inderdaad voor schelpenvloertjes.

De verwachting dat het zand matig stuifgevoelig zou zijn, waarbij de verstuiwing voornamelijk wordt beperkt door schelpen, is uitgekomen.

Het zand is veel minder stuifgevoelig dan het zand in het referentiegebied; het is slechter gesorteerd en bevat zowel meer fijne als meer grove deeltjes.

De zeereepkruin in het suppletiegebied op Midden-Ameland hoogt minder op dan het ernaast gelegen referentiegebied. Het tweede jaar nadat het suppletie-zand in 1990 is opgebracht, lijkt de aanstuiving toegenomen. Na drie jaar stuift er geen zand naar de zeereep, mogelijk als gevolg van de schelpenvloertjes.

2.4.2. Texel: Eierland

Doel en plaats van de suppleties

Het gebied is sinds lange tijd onderhevig aan sterke kusterosie. In 1979 heeft tussen RSP 25.40 en 31.20 een eerste zandsuppletie plaatsgevonden om het erosieverlies voorlopig te compenseren. In 1985 en in 1990 zijn herhalingsuppleties uitgevoerd. Voordat de dam bij Eierland zal worden aangelegd wordt nog éénmaal gesuppleerd. In 1994 is begonnen met het suppleren van het strand tussen RSP 25.20 en 28.20, waarbij het werk in het gedeelte tussen RSP 26.40 en 27.20 bij monsternamen nog niet is voltooid.

Analyse van gegevens van de wingebieden

Over de winlokatie Robbengat, die de suppleties van 1979 en 1985 van zand heeft voorzien, zijn geen boorstaten en korrelgrootte-analyses meer te achterhalen. Roelse en Hillen (1993) melden een d_{50} van suppletiezand uit 1979 van gemiddeld 195 μm en uit 1985 van gemiddeld 180 μm : dit is vrij fijn materiaal, maar benadert het gemiddelde van 200 μm dat voor aanvang van de twee suppletiewerken op het strand is gemeten.

Het wingebied voor de suppletie uit 1990 ligt ten westen van Texel (ten westen van de twintig meter dieptelijn op de Noordzee). Er is gewonnen op de toppen van zandgolven, tot een diepte van ongeveer twee meter beneden het oppervlak en niet in de vaak grindrijke plaatsen ertussen.

Gegevens van boringen, gezet en uitgewerkt door de Rijks Geologische Dienst, zijn afkomstig van de Directie Noordzee en de Dienstkring Texel van de Directie Noord-Holland van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, Noordzee, 1990; Rijkswaterstaat, Noord-Holland, Texel, 1994a en b). Binnen het wingebied liggen zes boorprofielen en acht aanvullende hapmonsters (monsters van de bovenste twintig centimeter) (Bijlage 2: 2b, 2h en 2i).

- **Korrelgrootte**
De grofheid komt tot uitdrukking in de Mm (gemiddeld 322 μm) en d_{50z} (gemiddeld 350 μm). Acht aanvullende hapmonsters in het zandwingebied geven een gemiddelde d_{50l} van 352 μm . Het zand is veel grover dan het zand van de vorige twee suppleties en van het oorspronkelijke zand met een d_{50} van ongeveer 200 μm .
- **Korrelgrootte-verdeling**
De grootte van de korrels ligt grofweg tussen 210 en 420 μm , maar er worden ook veel uiterst grove korrels gevonden. Het zand is echter goed gesorteerd (spreiding $S_{\text{RGD}} > 70 \%$).
- **Silt en klei**
Eénmaal is een harde, sterk kleiige siltlaag in een boorkern aangetroffen. Plaatselijk zijn er laagjes (slibhoudend) fijn zand.
- **Grind en stenen**
In de siltlaag komt een spoor grind voor. Ook op enkele andere plaatsen komen concentraties van grind en stenen voor.
- **Schelp(fragment)en**
Er is een spoor schelpgruis tot tamelijk weinig schelpen in de boorkernen aangetroffen.
- **Organische stof**
Er is geen organische stof in de profielen aangetroffen.
- **Kalkgehalte**
Het materiaal is matig kalkhoudend.

Ten behoeve van de suppletie van 1994-1995 is van dezelfde zandwinlokatie gebruik gemaakt als in 1990, zij het dat iets ten zuidwesten van het gebied is gewonnen. Er is een groot aantal boorstaten geanalyseerd, en er zijn 41 hapmonsters in het wingebied genomen (Rijkswaterstaat, Noordzee, 1990; Rijks Geologische Dienst, 1993b; Rijkswaterstaat, Noord-Holland, Texel, 1994a en b). Deze zijn ook gebruikt bij het opstellen van de hypothesen (zie ook Bijlage 2: 2c, 2h en 2i).

- **Korrelgrootte**
Uit een analyse van dertien boorprofielen is een gemiddelde d_{50m} van 299 μm berekend. Uit de analyses van de 41 hapmonsters is een gemiddelde d_{50m} van 315 μm berekend. Uit vijf andere boorprofielen is een Mm van gemiddeld 334 μm en een d_{50z} van 303 μm berekend.
- **Korrelgrootte-verdeling**
De gemiddelde d_{60}/d_{10} van twaalf boorprofielen (van één ervan is d_{60}/d_{10} vanwege een te hoog slibgehalte niet bepaald) is 1.84. De gemiddelde d_{60}/d_{10} van tien hapmonsters was 1.97. Het zand is redelijk gesorteerd ($S = 70 \%$).
- **Silt en klei**
In de achttien boorprofielen is binnen twee meter een aantal silt- en kleilagen en een aantal zandlagen met veel slib aangetroffen. Ook in de hapmonsters komt slibhoudend materiaal voor (fractie $< 63 \mu\text{m}$ is 2-5%).
- **Grind en stenen**
Binnen twee meter beneden de zeebodem is in zeven van de achttien boorprofielen grind (zij

het zeer weinig) aangetroffen. In de hapmonsters is eenmaal een grindlaag (meer dan 58% grind) aangetroffen, in alle andere monsters is een spoor grind of (tamelijk) weinig grind gevonden.

- Schelp(fragment)en
Het schelpgehalte varieert van een spoor schelpgruis (in de meeste profielen) tot tamelijk veel schelpgruis en schelpen (in één boorprofiel). In zeven van de 42 hapmonsters zijn 'veel' schelp(fragment)en aangetroffen.
- Organische stof
In enkele boorprofielen is veen aangetroffen op een diepte van meer dan twee meter. Het is echter niet waarschijnlijk dat dit materiaal wordt gesuppleerd. In twee andere boorprofielen zijn laagjes organisch materiaal in het zand gevonden. Er zit geen organische stof in de hapmonsters.
- Kalkgehalte
De door de Rijks Geologische Dienst (kwalitatief) gemeten kalkgehalten variëren zeer sterk.

Verwachtingen

Op basis van de gegevens van het zand in de twee wingebieden (gebruikt voor de suppleties in 1990 en 1994) worden de volgende verwachtingen uitgesproken.

- Het grove zand zal matig stuifgevoelig zijn.
- Het zand is redelijk gesorteerd en redelijk geschikt voor compactie. Verwacht wordt een matige stuifgevoeligheid.
- Effecten van tijdens suppletie van slibhoudend zand aangerijkt slib zijn niet uitgesloten.
- Er worden in ieder geval plaatselijk grindvloertjes gevormd.
- Er worden in ieder geval plaatselijk schelpenvloertjes gevormd.
- Organische stof speelt geen rol bij de verstuving.
- De toevoer van kalk naar de zeereep kan toenemen. Gezien het van nature kalkarme karakter van de zeereep kan dit voor veranderingen in de zeereepvegetatie (met name in de soortensamenstelling) zorgen.

Het zand is matig stuifgevoelig. Het zandtransport wordt plaatselijk beperkt door schelpenvloertjes.

Veldwerk

In het veld is gekozen voor monsternamen op het nog niet opnieuw gesuppleerde, maar waarschijnlijk wel al enigszins door de suppletie van 1994 beïnvloede gedeelte (RSP 26.60 en 26.80) en twee raaien in het onlangs gesuppleerde gebied (RSP 27.40 en 27.60). Tot slot is een raai uitgezet, waar zeker nog geen invloed van de laatste suppletie is en waar al eerder monsters zijn genomen, namelijk ter hoogte van RSP 29.00 (Olij, 1993). De volume-monsters zijn genomen langs een raai bij RSP 26.60 en op het droge strand bij RSP 27.40. Er is geen referentiegebied.

Tussen RSP 26.00 en 27.00 vertoont de zeereep een laag klif, de stuifschermen zijn weggeslagen na de laatste stormen. Tussen RSP 27.00 en 29.00 is veelal een soort banket aanwezig, waar ook met behulp van stuifschermen zand wordt opgevangen. Vooral op het droge strand zijn plekken met schelpenvloertjes gevormd, ook in het pas gesuppleerde gebied.

Windtunnelproeven

Het gedrag van het monstermateriaal tijdens de windtunnelproeven is zeer verschillend.

- Nog niet opnieuw gesuppleerd gebied
Bij windtunnelexperimenten met het zand van het natte strand (geelgrijs van kleur) is een schelpenvloertje gevormd (waarbij ook veel zeer grove zandkorrels zijn achterbleven), maar de verstuiving is niet geheel gestopt (48% is verstoven). In het veld worden schelpenaccumulaties op het natte strand steeds omgewoeld door de werking van de zee.
Van het (bruingele) zand van het droge strand is gemiddeld slechts 20% verstoven, hoewel het cohesieloos is. Naast schelpen, grind en stenen, vertragen ook grove (600-2000 μm) kwartskorrels die zich na het experiment in 'patches' en banden aan het oppervlak bevinden, de verstuiving.
Het (grijsbruine) zand van de zeereepkruin is tijdens de windtunnelproeven voor 53% verdwenen. Het zand bevat nauwelijks schelpen of grote schelpfragmenten, wel zijn kleine schelpfragmentjes achtergebleven. Ook zijn er grove korrels aan het oppervlak blijven liggen. Zij zijn mogelijk afkomstig van zand van eerdere strandsuppleties.
- Suppletie 1994
Het (bruingele) zand heeft een losse structuur. Hoewel het schelpen bevat, is het zand stuifgevoelig (gemiddeld 72%) en is er geen duidelijke schelpenvloer gevormd. Ook dit zand bevat enkele uiterst grove kwartskorrels die veelal achterblijven op de bodemplaat. Het zand kan in het veld door deflatie met schelpen worden aangerijkt.

Korrelgrootte-analyse

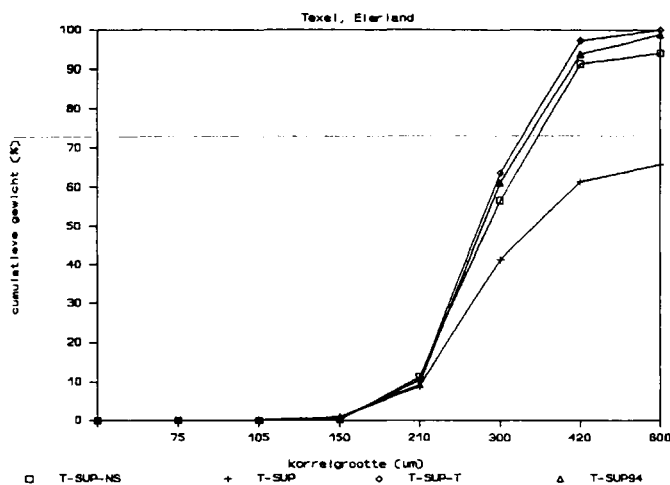
Er is een evenredig verband tussen de stuifgevoeligheid en de mediaan d_{50} (Figuur 5, Figuur 11 en Bijlagen 3 en 5): van het nog niet opnieuw gesuppleerde gebied bij RSP 26.60 stuift de zeereepkruin (met fijnkorrelig zand) het best, daarna het natte strand en daarna het droge strand met het meest grove zand. Hoewel de mediaan van het suppletiezand uit 1994 tussen die van de zeereepkruin en het natte strand van RSP 26.60 inligt, verstuift er veel meer.

De sortering d_{90}/d_{10} en de uniformiteitscoëfficiënt d_{60}/d_{10} zijn omgekeerd evenredig met de stuifgevoeligheid. Ook hier weer worden de hoogste waarden gevonden voor de zeereepkruin en de laagste waarden voor het droge strand. Opmerkelijk is de goede sortering en de zeer lage geschiktheid voor compactie ($U=1.40$) van het suppletiezand uit 1994.

Alle monsters bevatten zeer weinig fijne deeltjes ($< 75 \mu\text{m}$).

De zeereepkruin bevat weinig deeltjes groter dan 600 μm . Het zand van het natte strand uit dit gebied bevat een tamelijk hoog gewichtspercentage deeltjes van 600-2000 μm (vooral aggregaten die tijdens het drogen in de stoof zijn gevormd). Het weinig stuifgevoelige droge strand bevat zeer veel (namelijk meer dan 32%) schelpen in de fractie $> 2000 \mu\text{m}$. Het zand uit 1994 bevat enkele deeltjes in de fractie 600-2000 μm .

De resultaten van de korrelgrootte-analyse van het zand van de zeereepkruin bij RSP 26.6 verschillen zeer weinig van het onlangs gesuppleerde strandzand bij RSP 27.4, terwijl de windtunnelproeven een groot verschil in verstuiving te zien geven. Er zijn wel verschillen in cohesie. De matige verstuiving van het zand van het natte strand kan gedeeltelijk het gevolg zijn van verkitting door zouten.



Figuur 5. Korrelgrootte-verdeling van zand van Texel, Eierland:

- suppletie, nat strand, RSP 26.6 (T-SUP-NS)
- suppletie, droog strand, RSP 26.6 (T-SUP)
- zeereepkruin, RSP 26.6 (T-SUP-T)
- suppletie 1994, RSP 27.4 (T-SUP94).

Zandaanvoer

Bijlagen 6 en 7 tonen de zandaanvoer op Texel. Ter hoogte van RSP 27.40 vindt overstuiving plaats over de gehele breedte van de top (Bijlage 6). In de periode 1990-1993 heeft de meeste aanstuiving plaatsgevonden: meer dan 125 cm zand tegen ten hoogste 50 cm in de periode van drie jaar ervoor. Er is geen aanstuiving op de landhelling.

Op veel andere plaatsen in het gebied is in de periode 1987-1988 de zeereep naar achteren geschoven, en daarom ook lager geworden (van meer dan 15 meter naar plaatselijk minder dan 13 meter). Raaien in deze gebieden zijn niet bij de berekening van het zandbudget betrokken. Depositie vindt voornamelijk plaats op de zeereepkruin, over de gehele breedte van de top, maar ook de landhelling hoogt plaatselijk op. De gemiddelde aanstuiving op de zeereepkruin is vòòr de suppletie in 1990 minder dan 8 cm/j. Na de suppletie in 1990 neemt de aanstuiving toe tot gemiddeld 27 cm/j en daarna weer langzaam af tot gemiddeld 18 cm/j in de periode 1992-1993, na drie jaar verstuuving van suppletiezand. Ook de maximaal gemeten aanstuiving is groter in de periode na suppletie, tot een maximum van 82 cm/j, gemeten in de periode 1991-1992, na twee jaar verstuuving van suppletiezand. Mogelijk heeft zandsuppletie hier een versterkend effect op de aanstuiving gehad.

De variatie in de zandaanvoer leidt tot de volgende conclusies.

- De zandaanvoer na een jaar aanstuiving van suppletiezand (N=1) is groter dan in de periode voorafgaand aan suppletie.
- Na drie jaar aanstuiving van suppletiezand (N=3) is de zandaanvoer niet significant hoger meer dan de zandaanvoer voorafgaand aan suppletie.

Conclusies

Bekeken is of de verwachte materiaaleigenschappen van het zand ook in het suppletiegebied zijn aangetroffen.

- Het zand is inderdaad grof.
- De korrelgrootte-verdeling is niet bij alle monsters gelijk. Het monster van het pas opgebrachte suppletiezand heeft een goede sortering en een lage geschiktheid voor compactie.
- Het zand is, in tegenstelling tot de verwachtingen, niet slibhoudend.

- Er zijn inderdaad plaatselijk grindvloertjes gevormd.
- De schelpenvloertjes zijn over grote oppervlakken op het droge strand aangetroffen.
- Organische stof speelt inderdaad geen rol bij de verstuiving.

Het zand in het suppletiegebied op Eierland varieert in stuifgevoeligheid. De verwachte matige stuifgevoeligheid komt niet uit voor het pas opgebrachte suppletiezand, dat sterk stuift. Wel wordt het zandtransport inderdaad beperkt door schelpenvloertjes.

Mogelijk heeft de zandsuppletie uit 1990 op Eierland een effect gehad op de grootte van het zandtransport. Direct na suppletie is de verstuiving toegenomen, waarna zij drie jaar na suppletie weer de normale waarde heeft gekregen.

2.4.3. Texel: De Koog

Doel en plaats van de suppleties

In 1984 is tussen RSP 18.00 en 24.00 ter hoogte van De Koog op Texel zand op het strand aangebracht met een buffer tegen het duinfront, met als doel de kusterosie te compenseren en de achter de zeereep gelegen camping te beschermen. Het zand is afkomstig uit het Robbengat. Uit Roelse en Hillen (1993) blijkt dat voorafgaand aan de suppletie zand met een mediaan van 200 μm aanwezig was en dat het suppletiezand korrels van gemiddeld 180 μm heeft.

In 1991 was opnieuw een suppletie nodig. Het zand, dat tussen RSP 18.30 en 23.40 is aangebracht, is afkomstig van de zandgolven op de vooroever.

Zandaanvoer

De zeereep ter hoogte van RSP 21.11 is als voorbeeld genomen (Bijlage 6). De raai is representatief voor het gebied. De laatste jaren vindt sterke depositie plaats aan de zeewaartse zijde van de zeereepkruin. De depositie neemt landwaarts af en is verwaarloosbaar laag op de landhelling. De aanstuiving is maximaal 75-100 cm in de drie jaar in de suppletieperiode (1990-1993).

Hoewel in het gehele onderzochte gebied de aanstuiving na suppletie vrij hoog is (respectievelijk gemiddeld 32 cm/j na een jaar verstuiwing en 15 cm/j in het tweede jaar na suppletie) liggen de waarden binnen de waarden die in de periode voor de suppletie van 1991 zijn gemeten (gemiddeld -4 tot 38 cm/j). Een effect van zandsuppletie op het stuifgedrag is niet aan te tonen.

2.4.4. Noord-Holland: Zwanenwater

Doel en plaats van de suppletie

Zeewaarts van het Zwanenwater is in 1987 zand opgebracht. Met behulp van een sleeppopperzuiger is zand via een zinkerleiding op het strand gepompt, met een buffer tegen het duinfront. Er is tussen RSP 13.78 en RSP 18.10 gesuppleerd. Op een viertal plaatsen is tevens een aanvullende duinversterking gemaakt:

- RSP 14.70-15.34
- RSP 15.77-15.96
- RSP 16.63-16.77
- RSP 16.97-17.84.

Analyse van gegevens van het wingebied

Het zand is gewonnen uit het Schulpengat. Voor de interpretatie (zie Bijlage 2: 2d, 2h en 2i) is gebruik gemaakt van zeven zeef-analyses van boringen uit 1987, die door de Directie Noord-Holland van Rijkswaterstaat in het wingebied zijn genomen en van beschrijvingen uit 1966 van boorkernen die in de buurt of in het wingebied zijn genomen (Rijkswaterstaat, Noordzee, 1978; Rijkswaterstaat, Noord-Holland, 1986 en 1987a). De maximale zuigdiepte was veertien meter.

- Korrelgrootte
Uit de zeven monsters die in het wingebied zijn genomen, is een gemiddelde d_{50} berekend van 243 μm . Dit is waarschijnlijk van zand zonder schelpen. De mediaan, zoals die is berekend uit de analyses van de boorkernen (waarbij humus en kalk niet zijn verwijderd) uit 1966 is gemiddeld 283 μm . Het zand is matig grof. Het gewonnen zand lijkt enigszins grover dan het oorspronkelijke zand van ongeveer 255 μm (Roelse en Hillen, 1993).
- Korrelgrootte-verdeling
De d_{60}/d_{10} is vrij laag ($U=1.73$, d.i. het zand is niet geschikt voor compactie) en het zand is zeer goed gesorteerd ($S > 70\%$).
- Silt en klei
In enkele boorkernen zijn kleilagen aangetroffen.
- Grind en stenen
In één boorprofiel zijn enkele grindjes gevonden.
- Schelp(fragment)en
In alle boorkernen is schelpgruis aangetroffen, veelal is er veel van of zijn er veel schelpfragmenten.
- Organische stof
In enkele boorkernen zijn humeuze lagen en veenlagen gevonden.

Verwachtingen

De gegevens van het zand in het Schulpengat leiden tot de volgende uitspraken over de stuifgevoeligheid van het suppletiezand bij het Zwanenwater.

- Het grove zand zal matig stuifgevoelig zijn.
 - De korrelgrootte-verdeling is niet bepalend voor de stuifgevoeligheid.
 - Min of meer resistente kleilagen en brokken kunnen in het veld de verstuiving vertragen.
 - Plaatselijk kunnen grindjes residueel aanrijken en de verstuiving vertragen.
 - De verstuiving kan verhinderd worden nadat schelpfragmenten achter zijn gebleven bij verstuiving.
 - De verstuiving kan tijdelijk geremd worden door de aanwezigheid van organische stof.
- Verwacht wordt matig stuifgevoelig zand, waarvan het zandtransport aanzienlijk kan worden beperkt door schelpfragmenten.

Korrelgrootte-analyse

Er is geen veldwerk verricht en er zijn dus ook geen windtunnelproeven uitgevoerd. Wel zijn er, uit eerder onderzoek, enige gegevens over de eigenschappen van het opgebrachte zand bekend.

Direct na de suppletie heeft Rijkswaterstaat een bestekcontrole uitgevoerd (Rijkswaterstaat, Noord-Holland, 1987b): er zijn 21 strandmonsters genomen en gezeefd. De gegevens zijn ingevoerd in het programma GAPP (Fay, 1989), zodat de resultaten met de voor dit onderzoek verwerkte monsters kunnen worden vergeleken.

De korrelgrootte-karakteristiek van het zand is als volgt:

- mediaan (d_{50Z}) is gemiddeld 277 μm
- $U = d_{60}/d_{10}$ ligt ongeveer tussen 1.7 en 1.9
- $S = d_{90}/d_{10}$ ligt ongeveer tussen 2 en 4
- spreiding $S_{RGD} > 70\%$
- korrelgrootte is middel, plaatselijk fijn
- sortering is redelijk goed, plaatselijk goed
- grove staart in de verdeling, plaatselijk zeer kleine scheefheid
- leptokurtic, plaatselijk mesokurtic.

Olij (1993), die in 1991 monsters van het gebied heeft genomen (langs raaien ter hoogte van respectievelijk RSP 14.830 en 17.480), vond de volgende eigenschappen van strandzand en zand van de duinvoet:

- mediaan (d_{50Z}) van 307-374 μm
- $U = d_{60}/d_{10}$ ligt tussen 1.5 en 2.6
- $S = d_{90}/d_{10}$ ligt tussen 1.9 en 6.1
- banken met bruine schelpen en brokjes grijs materiaal.

Uit deze waarden kan worden afgeleid dat vrij grof zand is opgebracht. Olij (1993) vond zand met een grote variatie in korrelgrootte-verdelingen en dus met een wisselende stuifgevoeligheid. Ten dele kan dit liggen aan het feit dat ook niet gesuppleerd zand is bemonsterd, ten dele kunnen de veranderingen in de korrelgrootte-verdeling door eolische processen zijn ontstaan, omdat zowel is bemonsterd op plaatsen waar deflatie is opgetreden als op plaatsen waar zand is geaccumuleerd.

Zandaanvoer

Ter hoogte van RSP 15.65 is in de periode 1990-1993 meer zand (25 à 50 cm in drie jaar) aangestoven dan in de periode van drie jaar volgend op suppletie (maximaal 25 cm in drie jaar) (Bijlagen 6 en 7).

Ook in de rest van het gebied zijn de waarden laag. Slechts plaatselijk hoogt de top van de zeereep op, vooral aan de zeewaartse zijde. Ophoging op de landhelling ligt binnen de meetnauwkeurigheid. Op de meeste plaatsen is de suppletie van 1987 pas op de JARKUS-profielen van 1988 zichtbaar, maar op enkele plaatsen is zij al in 1987 opgemeten. Hoewel het maximum hoog is (135 cm/j), is de ophoging van de zeereepkruin na een jaar verstuiwing van suppletiezand nihil, waarbij rekening is gehouden met de waarschijnlijkheid dat de raai in 1988 iets te laag is ingemeten. Na twee jaar verstuiwing hoogt de zeereep meer op: gemiddeld 25 cm/j. Ook hier is een effect van zandsuppletie niet aan te tonen: in de periode 1991-1992 is er namelijk 24 cm/j verstoven, en dus liggen de waarden binnen de mogelijke variabiliteit.

Uit statistische analyse blijkt dat de aanstuiving na twee jaar verstuiwing na suppletie ($N=2$) groter is dan de aanstuiving voor suppletie ($N=0$).

Conclusies

De voorspelde materiaaleigenschappen van het suppletiezand zijn aan de hand van bovenstaande gegevens uit eerder onderzoek getoetst.

- Het suppletiezand is inderdaad vrij grof.
- Er zijn zeer grote verschillen in de waarden van d_{50}/d_{10} en d_{90}/d_{10} gevonden.
- Kleilagen en brokken zijn inderdaad in het veld aangetroffen. In hoeverre deze het zandtransport beïnvloeden, is niet duidelijk.
- Het gehalte aan grind, schelpfragmenten en organische stof is niet uit de gegevens af te leiden.

De materiaaleigenschappen van het suppletiezand lijken redelijk voorspeld te zijn.

Omdat geen windtunnelproeven zijn gedaan, kunnen de hypothesen over de stuifgevoeligheid van het zand niet worden getoetst.

Een effect van zandsuppletie op de aanstuiving is niet aan te tonen.

2.4.5. Noord-Holland: Camperduin-Egmond

Doel en plaats van de suppletie

Doel van de suppletie in 1992 was de kustlijnhandhaving en het herstel van de suppletie in 1990 bij Bergen en Egmond aan Zee. Vooral tussen deze twee plaatsen vindt veel erosie plaats. Er is in 1992 tussen RSP 26.2 en 38.50 gesuppleerd, met uitzondering van de stukken tussen RSP 30.00 en 31.50 en tussen 28.10 en 28.60.

Er is op het strand gesuppleerd en er is een banket tegen de duinvoet aangelegd tot 3.5 meter boven NAP. Het materiaal is met behulp van een sleepopper via een zinkerleiding opgespoten.

Analyse van gegevens van het wingebied

De gegevens van de winlokatie zijn bewaard bij de directies Noordzee en Noord-Holland van Rijkswaterstaat en ten dele bij de Rijks Geologische Dienst (Rijks Geologische Dienst, 1992). Het zand wordt gewonnen in de Noordzee, 10 kilometer voor de kust van Bergen-Egmond, op een diepte tussen 18 en 20 meter beneden NAP aan de binnenzijde van een brandingsrug. Binnen het uiteindelijk gekozen gebied ligt één door de Rijks Geologische Dienst verrichte boring. Twee boringen liggen er niet ver vandaan. De gegevens van de drie boringen (met een diepte tot ongeveer 2.5 meter) staan in Bijlage 2 (2e, 2h en 2i).

- **Korrelgrootte**
De d_{50m} ligt tussen de 200 μm en 250 μm (matig fijn tot matig grof zand), gemiddeld 215 μm . Voorafgaand aan de suppletie is op het strand een d_{50z} van 245 μm gemeten (Rijkswaterstaat, Noord-Holland, 1992).
- **Korrelgrootte-verdeling**
De korrelgrootte ligt tussen 105-300 μm (zeer fijn tot matig grof) zand. Het zand is goed tot zeer goed gesorteerd ($S > 70\%$). De geschiktheid voor compactie zal laag zijn.

- Grind en stenen
Er is geen grind in de boorkernen aangetroffen.
- Klei en silt
Er is geen klei en silt in de zandlagen aangetroffen.
- Organische stof
Er is geen organische stof in de boorkernen aangetroffen.
- Schelp(fragment)en
Binnen twee meter beneden de zeebodem wordt slechts een spoor tot zeer weinig schelpgruis, schelpfragmenten en gave schelpen aangetroffen. Dieper dan twee meter worden plaatselijk veel schelpfragmenten aangetroffen.
- Kalkgehalte
Het zand is kalkhoudend.

Verwachtingen

Op basis van de analyse van de gegevens uit het wingebied worden de volgende hypothesen opgesteld:

- Van het fijne zand wordt verwacht dat het stuifgevoelig is.
- De geschiktheid voor compactie zal laag zijn: het zand is stuifgevoelig. Het zand is goed gesorteerd: het effect hiervan op de verstuiving is nog niet geheel duidelijk.
- Grind, klei, silt en organische stof spelen geen rol bij de verstuiving.
- Schelp(fragment)en beperken de verstuiving.
- Het materiaal is kalkrijk. Voor het gebied ten zuiden van Bergen is het kalkgehalte in de zeereep van nature hoog, voor het gebied ten noorden van Bergen zou de aanrijking van kalk ongewenste gevolgen kunnen hebben voor de vegetatie.

Verwacht wordt stuifgevoelig zand, waarvan de verstuiving beperkt wordt door de vorming van schelpenvloertjes.

Veldwerk

Tijdens de suppletiewerkzaamheden in 1992 zijn schelpenbanken in het zand ontstaan. Tijdelijk is de verstuiving hierdoor vertraagd. Het suppletiezand is in 1994 grotendeels in zee 'verdwenen'. Bij 'RSP 32.40' is het banket echter nog zichtbaar. Hier is het volume-monster voor de windtunnelproeven genomen.

Als referentiegebied is het traject tussen RSP 30.00 en 31.50 gekozen. Hier is niet gesuppleerd, maar waarschijnlijk is er wel indirecte beïnvloeding door de suppletie. Op het strand bij RSP 30.25 is een referentiemonster voor de windtunnelproeven genomen.

Windtunnelproeven

De stuifgevoeligheid van zowel het referentiezand als het suppletiezand is in de windtunnel bepaald.

- **Referentie**
Het zand is cohesieloos en bevat weinig schelpen. Het is vrij wit van kleur. Omdat weinig zand is meegenomen, is er slechts 840 gram ingewogen en is de proef maar eenmaal uitgevoerd. Het zand is stuifgevoelig (68%).
- **Suppletie**
Het zand bevat naast enkele schelpen een aantal dode plantewortels van helm (het banket was gedeeltelijk ingeplant). Het zand is stuifgevoelig (56%), de aanwezige plantewortels worden gemakkelijk meegenomen, er blijven enkele fijne schelpfragmenten achter, maar het zand-transport blijft doorgaan. Het zand is bruingeel.

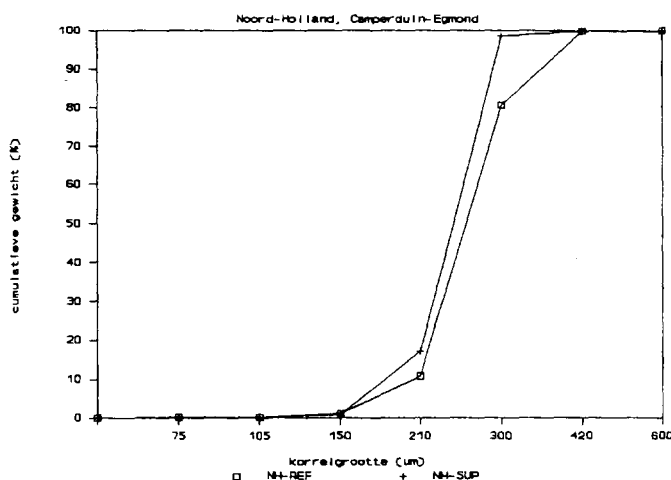
Korrelgrootte-analyse

Uit de korrelgrootte-analyse (Figuur 6, Bijlage 3) blijken slechts zeer geringe verschillen tussen suppletiezand en referentiezand. De mediaan van het suppletiezand is iets kleiner dan die van het referentiezand.

Beide zanden zijn goed gesorteerd. $U = d_{60}/d_{10}$ van het suppletiezand is iets hoger, hetgeen een verklaring zou kunnen zijn voor het feit dat het suppletiezand iets minder stuifgevoelig is.

De gewichtsfracties van zeer fijne en grove delen van suppletiezand en referentiezand verschillen nauwelijks. Beide zijn klein.

Het verschil in kleur (het suppletiezand is bruingeel en het referentiezand lichtgrijs) en het feit dat het referentiezand cohesieloos aanvoelt en het suppletiezand niet, wijst erop dat de ijzerverbindingen een rol zouden kunnen spelen bij het verschil in verstuving.



Figuur 6. Korrelgrootte-verdeling van zand van Noord-Holland, Camperduin-Egmond:

- referentie, RSP 30.25 (NH-REF)
- suppletie 1992, RSP 32.4 (NH-SUP).

Zandaanvoer

De resultaten van de berekeningen van de zandaanvoer zijn weergegeven in Bijlagen 6 en 7.

- **Schoorl, referentie**
Ter hoogte van RSP 30.50 vindt in de periode 1990-1993 een sterke ophoging plaats over de

gehele breedte van de zeereepkruin (75-100 cm in drie jaar) en in mindere mate ook op de landhelling.

Ook in de rest van het gebied hoogt de zeereep op. Sterke aanstuiving lijkt vooral in de periode 1991-1992 op de eerste top van de zeereep te hebben plaatsgevonden (gemiddeld 31 cm/j). Mogelijk speelt aanvoer van suppletiezand een rol. Er is een zandaanvoer van gemiddeld 0-25 cm/j naar de zeereepkruin, maximaal 98 cm/j. Op sommige plaatsen vindt ook depositie plaats in het gebied tussen de actuele zeereep en de ermee vergroeide tweede duinreeks. De landhelling is over het algemeen stabiel. Zuidwaarts van RSP 31.50 vertoont de zeereep een afslagklif. De ophoging op de top is hier ook zeer gering.

- **Bergen-Egmond, suppletie**

Ter hoogte van RSP 32.00 is de zeereep in de loop der tijd een aantal meters landinwaarts verplaatst. De berekeningen geven daarom een enigszins vertekend beeld. De kruin 'hoogt' op met maximaal 75 à 100 cm in de periode 1990-1993 en maximaal 50 à 75 cm in de periode 1987-1990 voor suppletie, waarin de kust afsloeg.

In het gehele onderzochte gebied tussen Egmond en Bergen (RSP 32-37) blijft de gemiddelde aanstuiving naar de zeereepkruin beneden 9 cm/j, met uitzondering van de periode 1991-1992, waarin de zeereepkruin met 21 cm is opgehoogd. Ook de maximum waarden zijn relatief laag: maximaal 52 cm/j.

Uit de statistische analyse blijkt het volgende.

- De aanstuiving na een jaar verstuiwing van suppletiezand (N=1), zowel van 1990 als van 1992, is niet significant verschillend van de aanstuiving voorafgaand aan suppletie.
- De aanstuiving na twee jaar verstuiwing van het suppletiezand van 1990 (N=2) is groter dan de aanstuiving voorafgaand aan suppletie (N=0).

Conclusies

De gegevens van het zand uit het wingebied zijn vergeleken met de analyse-resultaten van de monsters van het gesuppleerde zand.

- Het zand is inderdaad vrij fijn.
- Het zand is inderdaad goed gesorteerd en de geschiktheid voor compactie is inderdaad laag.
- Grind, klei, silt en organische stof spelen inderdaad geen rol bij de verstuiwing.
- Schelp(fragment)en hebben tijdelijk de verstuiwing beperkt.

De materiaaleigenschappen van het suppletiezand zijn goed voorspeld op grond van de gegevens van het zand uit het wingebied.

Het zand is inderdaad stuifgevoelig en de verstuiwing wordt vooral beperkt door de vorming van schelpenvloertjes.

Hoewel de samenstelling van het suppletiezand die van het oorspronkelijke zand benadert, is het suppletiezand toch iets minder stuifgevoelig dan het zand in het referentiegebied.

In de periode 1991-1992 is bij Bergen een verhoogde aanstuiving gemeten, die mogelijk het gevolg is van de zandsuppletie uit 1990.

2.4.6. Rijnland: Meijndel

Doel en plaats van de suppletie

In het kader van de kusthandhaving is vanaf de herfst van 1994 tussen RSP 93.0 en 96.0 een strandsuppletie uitgevoerd.

Analyse van gegevens van het wingebied

Op de winlokatie is een groot aantal boringen verricht (Rijks Geologische Dienst, 1993a en 1994a). De korrelgrootte-verdeling van uit de boorkernen genomen monsters is op vele manieren geanalyseerd (zie ook Bijlage 2: 2f, 2h en 2i).

- **Korrelgrootte**
Twee door de Rijks Geologische Dienst (1994b) op het strand genomen monsters (voorafgaand aan de suppletie) hebben een d_{50} van 376-420 μm . Op de winlokatie is een gemiddelde d_{50} van 339 μm gemeten. De d_{50} op de winlokatie is 267 μm . De d_{50} inclusief schelpen op de winlokatie is gemiddeld 276 μm tegen 338 μm van een monster op het nog niet gesuppleerde strandzand (Bijlage 3). Het zand in het wingebied is dus iets fijner dan het oorspronkelijke strandzand.
- **Korrelgrootte-verdeling**
De korrels zijn 63-1000 μm groot. In veel boorkernen is zeer grof zand gevonden. Het zand heeft een matige spreiding. U ligt tussen 1.80 en 2.18: het zand is geschikt voor compactie.
- **Silt en klei**
Er zijn enkele kleiballen en een slibhoudende laag en een siltlaag in de boorprofielen aangetroffen.
- **Grind en stenen**
In een aantal boorprofielen is grind aangetroffen. Vaak gaat het om slechts enkele grindjes per profiel.
- **Organische stof**
In enkele boorprofielen zijn lagen met (veel) organische stof gevonden.
- **Schelp(fragment)en**
Vier van de achttien onderzochte boorkernen bevatten tenminste één schelprijke laag. In de overige profielen is steeds weinig of een spoor schelpfragmenten aangetroffen.
- **Kalkgehalte**
Het materiaal is kalkhoudend, mede vanwege de aanwezigheid van schelpfragmenten en schelpgruis.

Verwachtingen

De gegevens van het zand in het wingebied leiden tot de volgende verwachtingen over de stuifgevoeligheid van het suppletiezand in Rijnland.

- Op grond van de mediaan wordt verwacht dat het suppletiezand stuifgevoeliger is dan het iets

- grovere oorspronkelijke zand, maar dat de stuifgevoeligheid slechts matig tot redelijk is.
 - De korrelgrootte-verdeling duidt op een matige stuifgevoeligheid.
 - Er kunnen plaatselijk enkele grindvloertjes worden gevormd. Zij zullen de verstuiwing nauwelijks beïnvloeden.
 - Slib kan aanrijken tijdens de suppletiewerkzaamheden.
 - Verwacht wordt dat organische stof (tijdelijk) een beperkende rol speelt bij de verstuiwing.
 - De verstuiwing wordt in ieder geval plaatselijk beperkt doordat schelpenvloertjes worden gevormd.
 - Effecten op de vegetatie door de toevoer van kalk worden niet verwacht.
- Verwacht wordt matig stuivend zand, waarbij het gehalte aan schelpen, en in veel mindere mate de korrelgrootte-verdeling en het gehalte aan organische stof niet gunstig zijn voor verstuiwing.

Veldwerk

In juli 1994, voordat de suppletie is opgebracht, zijn drie referentieraaien bemonsterd. Voor de windtunnelproeven (zie Bijlage 5) zijn op het strand en op de zeereepkruin bij RSP 93.50 volumemonsters genomen.

Eind december 1994 is het suppletiezand bemonsterd. Het zand is genomen van het droge strand bij RSP 93.25.

Windtunnelproeven

Het originele strandzand bevat zeer veel kleine schelpfragmenten. Deze verhinderen de erosie en gedragen zich als de grove korrels van het Texel-zand. De schelpfragmenten blijven grotendeels achter bij het verstuiwingsproces, maar het gevormde schelpenvloertje is niet geheel bedekkend. Gemiddeld is 51% van het materiaal tijdens de proef verstoven.

Het zand van de zeereepkruin bevat nauwelijks schelpen of fragmenten ervan. Er zijn wel veel wortels en dode stengeldelen: deze verstuiwen zeer gemakkelijk als zij eenmaal loszitten. Daarbij zijn er veel algen, al dan niet verkit aan zandkorrels. Zij blijven achter bij het verstuiwen en vormen een (niet gesloten) laagje, waardoor de verstuiwing wordt geremd tot 35%. Het strand- en zeereepzand zijn beide bruineel.

Er zijn geen windtunnelproeven met het suppletiezand gedaan. Verwacht wordt dat het fijne en 'losse' zand redelijk goed stuift, maar dat de schelpfragmenten in het zand de verstuiwing beperken.

Korrelgrootte-analyse

Uit de korrelgrootte-analyse (zie Figuur 7 en Bijlage 3) blijkt dat het originele strandzand grover is dan zand van de zeereepkruin.

Er zijn slechts kleine verschillen in de korrelgrootte-verdelingen van strand- en zeereepzand. Zowel d_{60}/d_{10} als d_{30}/d_{10} zijn van beide monsters gelijk. Het zand is goed gesorteerd en de korrelgrootte-verdeling heeft een zeer kleine scheefheid.

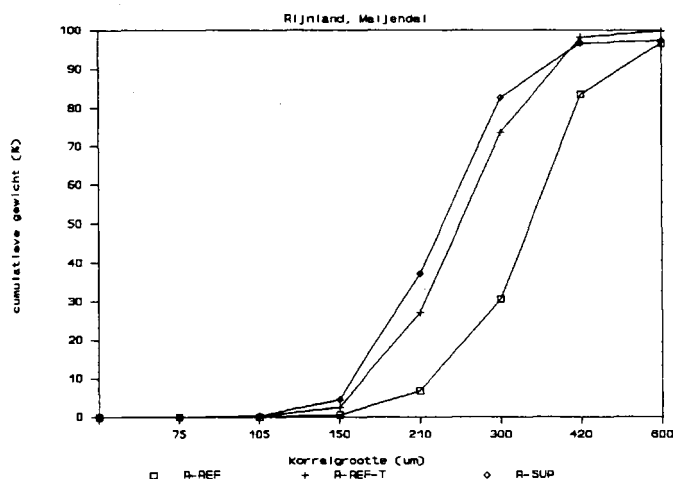
De fractie $< 75 \mu\text{m}$ is zowel in het strandzand als in het zeereepzand aanzienlijk (0.07-0.09%).

Het (grovere) strandmonster bevat zeer veel delen in de fractie 600-2000 μm (kleine schelpfragmenten). Bij het monster van de zeereepkruin is aan algen verkit zand in deze fractie terechtgeko-

men. Er zit nauwelijks materiaal groter dan 2000 μm in het zand.

Het zand dat gebruikt is voor de suppletie in 1994 is fijner dan het zand dat oorspronkelijk op het strand aanwezig is. Het meeste zand van het suppletiemonster valt in de klasse rond 2 phi (212-300 μm) en het oorspronkelijke zand bevat het meeste zand in de klasse rond 1.5 phi (300-425 μm). Het zand is redelijk goed gesorteerd en is leptokurtic en heeft een grove staart in de korrelgrootte-verdeling. Hoewel het suppletiezand minder goed gesorteerd is dan het oorspronkelijke strandzand, is het iets minder geschikt voor compactie. Materiaal < 105 μm komt in het suppletiezand net als in het originele zand weinig voor. Het monster van het suppletiezand bevat schelpfragmenten in de fracties > 600 μm ; in de fractie 425-600 μm bevat het zand ongeveer 20% schelpfragmenten en 80% minerale deeltjes.

Op enkele plaatsen in het gesuppleerde gebied is aan het oppervlak zwart tot donker roodbruin materiaal aangetroffen, waarschijnlijk omdat het zand magnetiet bevat. Korrelgrootte-analyse van een monster van dit zand wijst uit dat het zand meer deeltjes in de fractie rond 3 en 3.5 phi (75-150 μm) bevat dan het hierboven beschreven monster van het suppletiezand. In de fractie 600-850 μm zijn aggregaten van dit zeer fijne materiaal terechtgekomen.



Figuur 7. Korrelgrootte-verdeling van zand van Rijnland, Meijendel:

- referentie, strand, RSP 93.5 (R-REF)
- referentie, zeereepkruin (R-REF-T)
- suppletie 1994, strand (R-SUP).

Zandaanvoer

Omdat nog geen hoogtegegevens van na de suppletie bekend zijn (de meest recente JARKUS-data zijn uit 1993), is dit gebied voor de zandaanvoer referentie (Bijlagen 6 en 7).

Ter hoogte van RSP 94.00 blijkt een ophoging van maximaal 50 cm in de periode 1990-1993, over het algemeen 25 cm in drie jaar, maar waarschijnlijk moet hier een correctie worden uitgevoerd, daar het gehele dwarsprofiel van 1993 zo'n 25 cm hoger ligt dan die van 1990.

De geringe verschillen in de jaarlijkse dwarsprofielen zijn ook kenmerkend voor de rest van het gebied. De gemiddelde aanstuiving naar de zeereepkruin is 3 tot 11 cm/j. Plaatselijk is er een hoogte-verschil van 77 cm/j gemeten.

Conclusies

Zowel het zand van de winlokatie als het zand dat voorafgaand aan de suppletie op het strand aanwezig was als het gesuppleerde zand is geanalyseerd.

- Het suppletiezand is inderdaad fijner dan het oorspronkelijke strandzand.
- De korrelgrootte-verdeling is redelijk gunstig voor zandtransport.
- Grindvloertjes zijn niet in het veld aangetroffen. Ook het (volume)monster bevat geen grind.
- Het zand bevat in tegenstelling tot de verwachting nauwelijks deeltjes $< 75 \mu\text{m}$. Verder kan over het slibgehalte geen uitspraak worden gedaan.
- In het veld is organische stof niet op grote schaal waargenomen. In het monster is geen organische stof aangetroffen.
- Mogelijk kunnen schelpenvloertjes een rol spelen nadat de verstuiving op gang is gekomen. Het suppletiezand lijkt echter niet meer schelp(fragmenten) te bevatten dan van nature aanwezig is.

De eigenschappen van het suppletiezand zijn op grond van de gegevens op de winlokatie matig voorspeld.

Hoewel geen windtunnelproeven met het suppletiezand zijn gedaan, wordt verwacht dat het zand beter verstuift dan het zand dat voorafgaand aan de suppletie op het strand aanwezig was. Toch zal de verstuiving in de windtunnel als gevolg van schelpfragmenten die zich in het zand bevinden niet hoger zijn dan 65%.

2.4.7. Goeree: Kwade Hoek

Zandaanvoer

In het gebied is geen zandsuppletie nodig. Ter hoogte van RSP 7.00 (Bijlage 6) is gedurende de periode 1985-1993 tot meer dan 250 cm zand opgestoven tegen het duinfront. De dynamiek op de zeereepkruin is gering.

Plaatselijk hoogt de (eerste) top van de zeereep op, gemiddeld maximaal 16 cm/j, met uitschieters tot 96 cm/j (Bijlagen 6 en 7). De ophoging op de landhelling en in het erachtergelegen gebied is zeer gering: zij valt binnen de meetnauwkeurigheid van 10 cm.

2.4.8. Schouwen: Kop van Schouwen

Doel en plaats van de suppleties

Het gebied waar in 1987 is gesuppleerd (RSP 13.20 - 15.60), ligt aan de (zuid)westkust van Schouwen aan de geul het Krabbengat. Door het oostwaarts verplaatsen van de geul en door golfaanval vindt veel erosie plaats. Voor de suppletie in 1987 is gebruik gemaakt van de Deense suppletiewijze, waarbij een hopperzuiger het zand via een 'rainbow' op het strand spuit. Een vergroving na opbrenging wordt daarom verwacht (Kant, 1992). Het zand is op het strand met bulldozers in profiel gebracht.

Tussen de vuurtoren en De Punt (RSP 11.60 - 17.30) was in 1991 opnieuw een suppletie nodig. Het zand is met cutterzuigers opgezogen en via een persleiding op de vooroever, op het strand en tegen de duinen gepompt. Met behulp van bulldozers, kranen en shovels is een duinaanvulling gemaakt tussen zes en tien meter boven NAP. Er is helm ingeplant en er zijn rijshoutschuttingen geplaatst om het zand zoveel mogelijk vast te houden.

Analyse van gegevens van de wingebieden

Het zand voor de suppletie uit 1987 is gewonnen op de oostrand van de zandplaat de Krabbenplaat om het Krabbengat weer zeewaarts te 'verplaatsen'. In boringen door de Adviesdienst Vlissingen van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, Zeeland, 1986) is tot ongeveer tien meter beneden NAP voor suppletie redelijk geschikt materiaal aangetroffen, hoewel het materiaal slibhoudend is. Eronder liggen dikke kleibanden en -brokken. Uit de boorstaten (beschouwd tot tien meter beneden NAP) en uit de analyse-resultaten van enkele monsters uit de boorprofielen zijn de stuifparameters bepaald (zie ook Bijlage 2: 2g, 2h en 2i).

- Korrelgrootte
De korrelgrootte van het zand is vrij hoog ($d_{50m} = 287 \mu m$).
- Silt en klei
Het slibgehalte is relatief hoog en varieert van zeer weinig slibhoudend tot matig veel kleibanden en -brokken in de zandlagen. Dieper dan tien meter beneden NAP (waarschijnlijk niet gesuppleerd) komen ook dikkere kleilagen voor.
- Grind en stenen
In geen van de boorstaten is de aanwezigheid van grind beschreven.
- Organische stof
In een paar boorkernen zijn enkele detritusbrokjes aangetroffen. Het organische stofgehalte in het zand is echter vrij hoog (ongeveer 0.7%).
- Schelp(fragment)en
Het gehalte aan schelpgruis, schelpfragmenten en gave schelpen varieert van zeer weinig tot veel schelpgruis en enkele schelp(stuk)ken.
- Kalk
Het kalkgehalte is 2 tot 4%. Het hoge gehalte wordt mede bepaald door de hoeveelheid schelpen.

Het zand voor de suppletie van 1991 is ook gewonnen op de randen van de zandplaten ten westen van het Krabbengat, maar ten noorden van de winlokatie van 1987 (Rijkswaterstaat, Zeeland, Deltakust, 1991). Er zijn geen boorgegevens van de Rijks Geologische Dienst gevonden uit het wingebied. De verwachting is echter, dat het zand gelijkenis zal vertonen met het zand dat voor de suppletie van 1987 is gebruikt.

Verwachtingen

Van het zand van de Krabbenplaat wordt het volgende verwacht.

- Het grove zand zal matig stuiven.
- Gezien de sterke gelaagdheid van het materiaal wordt een slechte sortering en een hoge geschiktheid voor compactie verwacht van het tijdens de suppletiewerkzaamheden gemengde zand.
- Slib zal de verstuiving beperken.
- Grind en stenen spelen geen rol bij de verstuiving.
- In geringe mate beïnvloedt organische stof de verstuiving negatief.
- De verstuiving van zand wordt sterk beperkt door schelpen.

- Het kalkgehalte is vergelijkbaar met de hoeveelheid kalk die van nature in nog niet uitgeleegde gebieden langs de kust ten zuiden van Bergen voorkomt. Er wordt daarom geen effect op de vegetatie verwacht.

Het suppletiezand voor de suppleties op de Kop van Schouwen zal matig stuifgevoelig zijn, waarbij met name schelpen, en in mindere mate ook slib en organische stof voor een verminderde stuifgevoeligheid van het zand zorgen.

Veldwerk

Tussen RSP 12.00 en 14.00 is de suppletie uit 1991 zeer duidelijk voor de oude klifkust zichtbaar. In doorsnede, te zien aan het klif van de suppletie, zijn duidelijk schelpenbanken zichtbaar, die resistenter zijn en na kustafslag uitsteken. Door eolische processen komen de banken aan het oppervlak en verhinderen verdere verstuiving. Ook schelpen die verdeeld zijn over de suppletie worden aangerijkt tijdens het deflatieproces. Tevens zijn lagen met fijn materiaal waargenomen die zijn verhard, waardoor onderliggend zand voor verstuiving wordt behoed. Op de top van de suppletie is bij RSP 13.55 een volume-monster voor de windtunnelproeven genomen.

Ter vergelijking is op dezelfde raai een monster van het oorspronkelijke klif genomen. Daarnaast is als referentiegebied gekozen voor de kust tussen RSP 10.00 en 11.00, waar nog niet is gesuppleerd. Het golfklimaat is hier echter wel anders. De kust is een aangroeikust en voor de zeereep wordt nieuw duin gevormd. Op het droge strand is het monster voor windtunnelproeven genomen.

Windtunnelproeven

De resultaten van de windtunnelproeven (Bijlage 5) zijn verschillend voor suppletie en referentiezand, maar de verschillen zijn kleiner dan die voor het zand van Ameland.

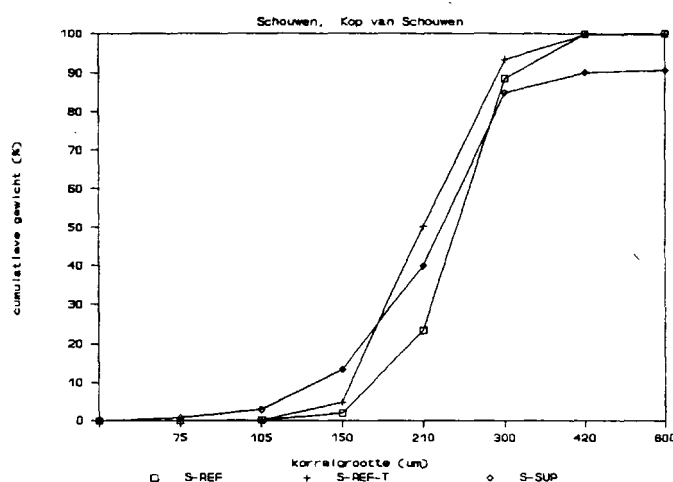
- **Referentie**
De verstuiving wordt enigszins geremd door schelpen. Gemiddeld verstuipt er 54%. Het zand is licht van kleur (grijs tot geelbruin).
- **Referentie (klif)**
Het zand is stuifgevoelig, hoewel er veel takjes van de op het klif overgebleven struiken aanwezig zijn. Gemiddeld verstuipt 63%. Het zand is grijsgeel.
- **Suppletie 1991**
Er zijn schelpen en fragmenten ervan die een vloertje vormen en verdere erosie vertragen maar nog niet geheel verhinderen. Het zand bevat zeer fijn materiaal, ook samengeperst in de vorm van grijze brokjes. Voor het tweede experiment is zand gebruikt dat minder schelpfragmenten bevat: het resultaat is een grotere verstuiving. Gemiddeld stuift er 41%. Het zand is donkergrijs.

Korrelgrootte-analyse

Uit korrelgrootte-analyse (Figuur 8 en Bijlagen 3 en 4) blijkt dat het gesuppleerde zand een kleinere mediaan heeft dan het zand uit het referentiegebied, maar niet kleiner dan die van zand van het oude klif.

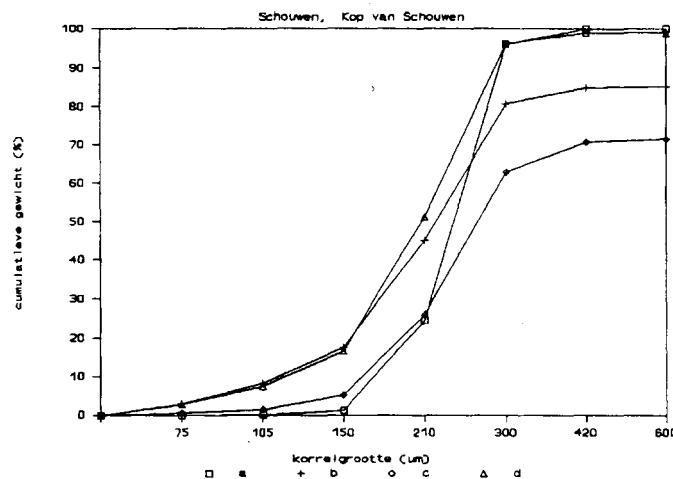
De resultaten van de windtunnelproeven zijn weer omgekeerd evenredig met de d_{60}/d_{10} : de geschiktheid voor compactie is bij suppletiezand het hoogst, de stuifgevoeligheid het laagst. Het suppletiezand is redelijk goed gesorteerd, maar het zeereepzand is goed gesorteerd en het niet gesuppleerde strandzand zeer goed. Het suppletiezand heeft een grove staart in de korrelgrootte-verdeling.

Het suppletiezand bevat in tegenstelling tot het referentiezand zowel zeer veel fijn materiaal (fractie $< 75 \mu\text{m}$) als veel materiaal in de fracties $600\text{--}2000 \mu\text{m}$ en $> 2000 \mu\text{m}$.



Figuur 8. Korrelgrootte-verdeling van zand van de Kop van Schouwen:

- referentie, strand, RSP 10.44 (S-REF)
- referentie, klif, RSP 13.55 (S-REF-T)
- suppletie 1991, RSP 13.55 (S-SUP).



Figuur 9. Variatie in korrelgrootte-verdeling en korrelgrootte-verdeling na sortering door de wind op de Kop van Schouwen (RSP 13.08):

- a. droog strand
- b. kleilaag in suppletie-zand uit 1991
- c. schelpenvloer na verstuiwing van het suppletie-zand uit 1991
- d. accumulatie van verstoven suppletie-zand uit 1991.

Sortering door de wind

Tot nu toe zijn met name onbewerkte zandmonsters van de suppletie en monsters van het na verstuiwing achtergebleven suppletiezand (veelal schelpenvloertjes) behandeld. Het verstoven suppletiezand is echter ook bemonsterd. De veranderingen die plaatsvinden na het opbrengen van het zand zijn uitgewerkt voor de duinfrontsuppletie op Schouwen (zie Figuur 9 en Bijlage 4). Op de suppletie zijn plaatselijk accumulatievormen met vitale helm zichtbaar. De planten hebben te maken met de textuur en dus de vocht- en zuurstofvoorziening van dit verstoven zand.

Helaas is van het materiaal van de suppletie op Schouwen geen diepte-monster genomen. De samenstelling van onbewerkt zand van deze suppletie is dus niet bekend, hoewel uit veldobservaties is gebleken dat het fijn materiaal en schelpen bevat en er resistentere lagen in het zand voorkomen met schelphoudend materiaal en lagen met klei en fijn zand (zie de analyse van monster 803 in Bijlage 4). De samenstelling van het verstoven zand kan wel met de eigenschappen van zowel geaccumuleerd zand uit het referentiegebied als zand dat is achtergebleven na verstuiving van het suppletiezand (het schelpenvloertje) worden vergeleken.

Het verstoven zand bevat nauwelijks schelpen of schelpfragmenten ($< 2\%$ versus de tot 25% die na verstuiving aan het oppervlak achterblijft), maar nog wel iets meer dan verstoven zand op de referentielokatie. Ook het gehalte aan zeer fijn materiaal (fractie $< 105 \mu\text{m}$) lijkt te zijn afgenomen, zowel als percentage van het totale gewicht als fractie van het gewicht aan minerale delen ($< 600 \mu\text{m}$), maar ook in dit geval is het gehalte wel groter dan in het geaccumuleerde zand in het referentiegebied.

Na verstuiving is het zand beter gesorteerd en minder geschikt voor compactie. Het verstoven suppletiezand is redelijk goed tot goed gesorteerd, terwijl het achtergebleven zand redelijk tot redelijk goed gesorteerd is. Zand in de accumulatiezone in het niet-gesuppleerde gebied is goed tot zeer goed gesorteerd. Hoewel het geaccumuleerde suppletiezand nog wel afwijkt van het oorspronkelijke zand dat is verstoven, lijkt de korrelgrootte-verdeling er meer op dan die van het pas opgebrachte zand.

Zandaanvoer

De zandaanvoer op Schouwen is weergegeven in Bijlagen 6 en 7.

- Kop van Schouwen, referentie
Er vindt een forse aanstuiving tegen het duinfront plaats. De hierdoor gevormde nieuwe 'zeereep' is ongeveer 7 meter hoog. Ter hoogte van RSP 10.84 is de aanstuiving voor de zeereep meer dan 125 cm in drie jaar en op het vlakke gedeelte voor de oude zeereep nog ongeveer 75 à 100 cm in drie jaar. De oude zeereep vertoont weinig dynamiek. Ter hoogte van RSP 10.84 vindt een verlaging van het oppervlak plaats. Er is hier een stuifkuil. Ook langs de andere raaien vindt weinig aanstuiving plaats: maximaal 53 cm/j.
- Kop van Schouwen, suppletie
Ter hoogte van RSP 13.08 vindt op de top enige aanstuiving plaats tot op de landhelling. De aanstuiving is zo'n 10 à 25 cm in drie jaar. De geringe ophoging vindt men ook terug in de rest van het gebied. Uit analyse van de hoogte-verschillen van tien raaien blijkt een constante aanstuiving (gemiddelden beneden 10 cm/j). Twee maal, steeds na twee jaar verstuiving van een zandsuppletie, is een verhoogde gemiddelde waarde gevonden, namelijk respectievelijk 25 cm/j en 16 cm/j, met in het eerste geval een maximum aanstuiving van 88 cm/j. Op de in 1991 aangebrachte buitenduinrandsuppletie (die niet is betrokken bij de analyse van de zeereepkruin) is weinig dynamiek. Als depositie plaatsvindt, kan dit overal in het profiel tussen het duinfront en de binnenzeereepvoet zijn.
Opgemerkt moet worden dat met de suppletie van 1987, die voornamelijk op het strand is aangebracht, veel minder zand gemoeid gaat dan met de duinfrontsuppletie in 1991.

Uit de statistische analyse blijkt het volgende.

- Het verschil tussen de zandaanvoer na een jaar verstuiving van suppletiezand ($N=1$) en de aanstuiving voor de suppletie ($N=0$), is voor zowel de suppletie van 1987 als die van 1991 niet aantoonbaar.
- Ten opzichte van de aanstuiving voor suppletie is na twee jaar verstuiving ($N=2$) van de

suppletie uit 1987 wel meer aangestoven, maar na twee jaar verstuiving van de suppletie uit 1991 (N=2) niet significant meer aangestoven. Mogelijk wordt de verstuiving van zand bij de strandsuppletie uit 1987 minder beperkt door de vorming van schelpenvloertjes dan bij de duinfrontsuppletie uit 1991.

- In het tweede jaar na suppletie (N=2) verstuipt bij beide suppleties significant meer zand dan in het eerste jaar na suppletie (N=1).
- In het derde jaar na de suppletie van 1987 (N=3) verstuipt minder dan twee jaar na suppletie, maar niet significant minder dan voorafgaand aan de suppletie (N=0).

Conclusies

De hypothesen die zijn opgesteld op grond van de gegevens uit het wingebied zijn getoetst aan de hand van de resultaten van de korrelgrootte-analyse van het gesuppleerde zand.

- Het zand is fijner dan verwacht.
- Het zand is inderdaad niet goed gesorteerd en geschikt voor compactie.
- Het zand lijkt inderdaad slibhoudend.
- Grind en stenen spelen inderdaad geen rol bij de verstuiving.
- Het zand bevat inderdaad enig organisch materiaal.
- De verstuiving van zand wordt inderdaad sterk beperkt door schelpen.

De materiaaleigenschappen van het suppletiezand zijn goed voorspeld.

Zoals verwacht is het zand op de Kop van Schouwen matig stuifgevoelig. Met name schelpen zorgen voor een verminderde stuifgevoeligheid. De rol van slib en organische stof op de verstuiving is nog niet geheel duidelijk.

Het suppletiezand is zeer verschillend van het goed gesorteerde en weinig fijn en grof materiaal bevattende referentiezand.

Het jaar direct nadat de zandsuppletie is opgebracht, is er geen verandering in de aanstuiving geconstateerd. Het tweede jaar na beide suppleties verstuipt er significant meer zand. In de periode 1989-1990, na drie jaar verstuiving van suppletiezand, is geen aanstuiving gemeten. Weinig aanstuiving naar de zeereepkruin is echter niet uitzonderlijk voor dit gebied.

2.4.9. Walcheren: Westkapelle-Zoutelande

Doel en plaats van de suppleties

Op Walcheren is een groot aantal zandsuppleties uitgevoerd. Hoewel voor het vegetatiekundig deel drie gebieden zijn onderzocht, is de zandaanvoer alleen van het gebied tussen Westkapelle en Zoutelande bepaald. In dit gebied is in 1984 en in 1988 gesuppleerd. In 1990 is tussen RSP 23.7 en 24.9 opnieuw een zandsuppletie uitgevoerd voor het herstellen van de stormschade en de reconstructie van de hoofden. Het zand is gerecruteerd uit het Bankje van Zoutelande en is met behulp van een slee-hopperzuiger opgebracht. In 1991 is in het kader van de kustlijnhandhaving tussen RSP 21.90 en 25.90 nogmaals gesuppleerd met zand dat zowel afkomstig is uit het Bankje van Zoutelande als van de Nolleplaat (Roelse en Hillen, 1993).

Zandaanvoer

Ter hoogte van RSP 24.70 vindt weinig zandtransport naar en binnen de zeereep plaats (Bijlage 6). Verschillen in aanstuiving tussen de periode 1987-1990 en de periode 1990-1993 hangen waarschijnlijk alle samen met meetfouten.

Ook in de rest van het gebied vindt zeer weinig depositie plaats op de kruin en is de landhelling stabiel (Bijlagen 6 en 7). De gemiddelde opstuiving is maximaal 16 cm/j. De minimum- en maximum zandaanvoer liggen vrij dicht bij elkaar: de dynamiek is gering. De zeehelling schrijdt langzaam parallel terug door kustafslag. De zeereep is hoog (20 à 25 meter).

Een effect van zandsuppletie op de aanstuiving is niet aan te tonen.

2.5. Conclusies

2.5.1. Materiaaleigenschappen

De eerste doelstelling van dit onderzoek was na te gaan in hoeverre het mogelijk is op grond van de op de winlokatie bepaalde gegevens van zand voorspellingen te doen over het stuifgedrag van suppletiezand.

Als eerste stap hiertoe is bekeken of de materiaaleigenschappen van zand in het wingebied overeenkomen met de in het veld gevonden eigenschappen. Daarom is een overzicht gemaakt van zowel de verwachte als de bepaalde materiaaleigenschappen per suppletie (Bijlage 8), dat hieronder wordt toegelicht.

- Korrelgrootte

De mediaan d_{50} kan globaal uit de gegevens van de winlokatie worden voorspeld; alleen de mediaan voor het suppletiezand op Schouwen is lager dan verwacht.

Uit Figuur 10 blijkt dat verschillen tot 50 μm echter voor kunnen komen (vergelijk c met d en e). Vooral voor Texel, maar ook voor Ameland en Schouwen geldt dat de mediaan van onderzocht zand in het wingebied (c) grover is dan het zand dat oorspronkelijk op het strand aanwezig was (a). Na suppletie (d) is het verschil al kleiner geworden. De verschillen tussen de waarden van d en e kunnen voor Ameland en het Zwanenwater het gevolg zijn van selectieve erosie, waardoor grof materiaal achterblijft.

- Korrelgrootte-verdeling

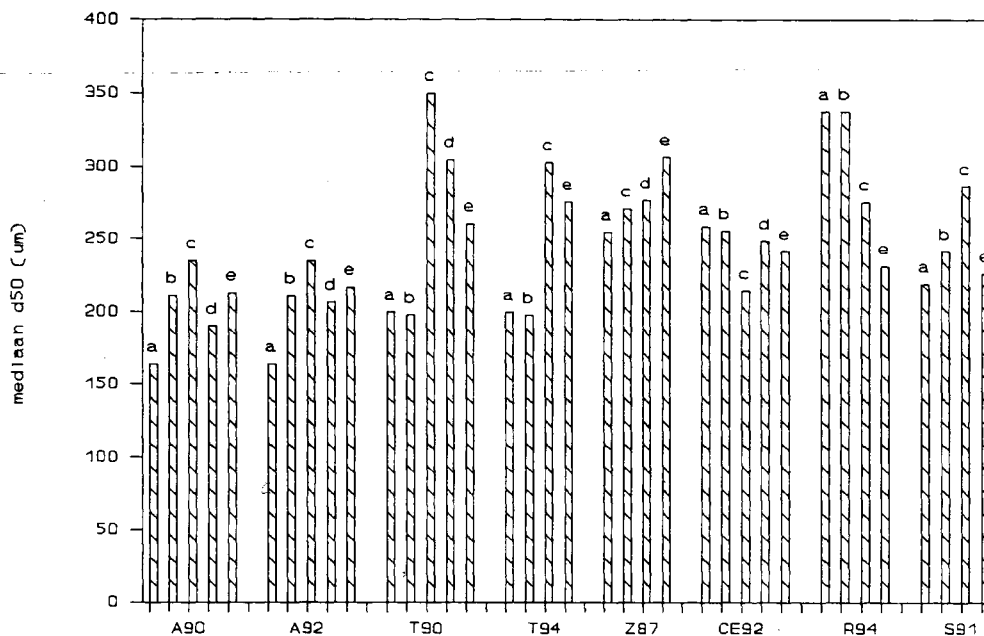
De op grond van de resultaten van het onderzoek op de winlokatie verwachte korrelgrootte-verdeling is in het veld over het algemeen ook aangetroffen. Een verklaring voor de waargenomen afwijkingen kan zijn dat het zand tijdens de suppletiewerkzaamheden gemengd wordt: de samenstelling van suppletiezand is de resultante van de korrelgrootte-verdelingen van de afzonderlijke lagen in het wingebied.

- Klei en silt

Het gehalte aan klei en silt is niet in het laboratorium onderzocht, maar observaties tijdens veldwerk en de resultaten van de korrelgrootte-analyse duiden erop dat de voorspellingen voor twee wingebieden niet juist zijn: in tegenstelling tot de verwachting op grond van de gegevens op de winlokatie lijken de suppleties op Ameland slibhoudend en de suppletie van 1994 op Texel slibarm. Op Schouwen is zoals verwacht slibhoudend materiaal aangetroffen.

- Grind en stenen

De voorspellingen voor grind en stenen komen goed uit.



Figuur 10. Mediaan van:

- het strand voorafgaand aan de suppletie-werkzaamheden (uit Roelse en Hillen (1993) en uit projectgegevens van Rijkswaterstaat)
- het referentie-gebied (uit monsters voor dit onderzoek, zie Bijlage 3; mediaan T90b en T94b uit Olij (1993))
- het wingebied (uit gegevens van Rijkswaterstaat en Rijks Geologische Dienst, zie Bijlage 2)
- het gebied direct na suppletie (uit gegevens van de bestekcontrole door Rijkswaterstaat)
- het gebied anno 1994 (uit monsters voor dit onderzoek, zie Bijlage 3; mediaan Z87e uit Olij (1993))

voor de suppleties Midden Ameland (A90 en A92), Texel: Eierland (T90 en T94), Noord-Holland: Zwanenwater (Z87), Noord-Holland: Camperduin-Egmond (CE92), Rijnland: Meijndel (R94) en Kop van Schouwen (S91).

- Organische stof

De organische stof die is verwacht op grond van de gegevens van onderzoek op de winlokatie van suppletiezand voor Eierland op Texel en voor Meijndel in Rijnland zijn niet in het veld aangetroffen. Voorspellingen voor de andere gebieden zijn wel uitgekomen.

- Schelpen en schelpfragmenten

Vrijwel alle boorprofielen bevatten schelpen en schelpfragmenten, in de gebieden is minstens één schelprijke laag aangetroffen. De monsters van suppletiezand die zijn genomen voor de windtunnelproeven bevatten ook alle een relatief hoog gehalte aan schelp(fragment)en. Op grond van gegevens op de winlokatie is niet met zekerheid te zeggen of de schelpen in het veld voor schelpenvloertjes gaan zorgen. Zelfs een kleine hoeveelheid schelpen kan in het veld na enige deflatie aanrijken en ervoor zorgen dat de verstuijing voor een zeer groot gedeelte wordt beperkt. Hoogwaterstanden en hun overschrijdingskansen zijn naar alle waarschijnlijkheid van belang voor het reactiveren van het verstuijingsproces.

De verwachtingen kunnen slechts kwalitatief zijn. Doordat vaak niet meer dan een paar boringen in het wingebied zijn gezet en doordat vaak niet alle parameters zijn bepaald, is het door de zeer grote afwisseling in materiaaleigenschappen in een aantal gevallen niet mogelijk een goede voorspelling te doen over de rest van het zand in het wingebied. Daarnaast moet worden opgemerkt dat de vergelijking van materiaaleigenschappen wordt bemoeilijkt doordat de korrelgrootte(-verdeling) op verschillende wijzen is bepaald, met steeds een andere uitkomst: door middel van zeven (waarbij humus en kalk soms wel en soms niet zijn verwijderd en waarbij verschillende zeefcombinaties zijn gebruikt), door middel van een vergelijkingsmicroscop en door middel van een laser counter. In sommige gevallen is de bepalingswijze niet meer bekend.

De vergelijking van materiaaleigenschappen in het wingebied en in het veld met eigenschappen van niet gesuppleerd zand van strand en zeereep (zie bijvoorbeeld Eisma, 1968; Depuydt, 1972; Kohsiek, 1984; Van Bemmelen, 1988), die ook weer met gebruikmaking van diverse technieken en methoden zijn bepaald, is daardoor niet mogelijk.

2.5.2. Stuijgevoeligheid van zand

Relaties tussen de materiaaleigenschappen en de stuijgevoeligheid

De tweede doelstelling van het onderzoek was te bepalen welke parameters invloed hebben op de verstuijingsgevoeligheid van zand. De resultaten van de geanalyseerde monsters zijn in grafieken uitgezet tegen de uitkomsten van de windtunnelproeven (Figuur 11), zodat inzicht is verkregen in de invloed van de onderzochte parameters op de stuijgevoeligheid. Er is nagegaan of de op grond van de literatuur veronderstelde relaties juist zijn en of de stuijgevoeligheid kan worden afgeleid uit gegevens van onderzoek op de winlokatie.

- Korrelgrootte

Verwacht werd dat de stuijgevoeligheid afneemt met de mediaan, vooropgesteld dat het zand weinig deeltjes $< 100 \mu\text{m}$ bevat. De relatie tussen de mediaan d_{50} en de hoeveelheid tijdens windtunnelproeven verstoven zand is echter niet recht evenredig. Het suppletiezand van Ameland (zowel uit 1990 als uit 1992) en Schouwen bijvoorbeeld stuijt niet of nauwelijks maar heeft een lage mediaan. Het oorspronkelijke strandzand bij Rijnland is vrij grof, maar is stuijgevoelig, terwijl het zeereepzand fijner is, maar minder stuijt. Het grove zand van de laatste suppletie op Eierland is zeer stuijgevoelig. Dit wijst erop dat ook andere factoren van invloed zijn op de stuijgevoeligheid.

- Korrelgrootte-verdeling

Op grond van literatuur is verwacht dat het zandtransport enigszins lager kan zijn bij goed gesorteerd zand dan bij slecht gesorteerd zand. In Figuur 11 is de standaarddeviatie van de korrelgrootte-verdeling van de onderzochte monsters uitgezet tegen de stuijgevoeligheid van zand. Depuydt (1972) vond langs de Belgische kust een maximale waarde voor de standaarddeviatie van 0.39. In Figuur 11 is dit de overgang tussen een slechte en een zeer goede correlatie tussen sortering en verstuijing (met als uitzondering het door verkitting van algen slecht verstuijende, maar redelijk gesorteerde zand van de zeereepkruin in Rijnland). Mogelijk valt de korrelgrootte-verdeling van suppletiezand in een aantal gevallen (Ameland, Schouwen en plaatselijk Texel) buiten het spectrum van in de literatuur gebruikte waarden voor onderzoek naar de relaties tussen sortering en stuijgevoeligheid.

Er is een zwak omgekeerd verband gevonden tussen d_{90}/d_{10} (een maat voor de sortering) en de hoeveelheid tijdens de windtunnelexperimenten verstoven materiaal. Voor schelprijk suppletiezand is d_{90} vaak niet exact te bepalen, doordat de grofste fractie meer dan 10%

materiaal bevat. Er geldt: als de sortering goed is (d_{90}/d_{10} is 1-2), is het zand stuifgevoelig (d.i. meer dan 55% van het zand is tijdens windtunnelproeven verstoven), als de sortering matig is (d_{90}/d_{10} is 2-3), stuift het zand matig (45-55% is verstoven) en als de sortering slecht is (d_{90}/d_{10} is groter dan 3), verstuft er weinig zand (d.i. minder dan 45%).

De geschiktheid voor compactie ($U=d_{60}/d_{10}$) is ook omgekeerd evenredig met de verstuiwing (Figuur 11), zoals verwacht. Over het algemeen is de U van zandsuppleties hoger dan het betreffende referentiezand: het suppletiezand is minder stuifgevoelig. $U > 1.7$ geeft al weinig verstuiwing (minder dan 45% verstuft tijdens de windtunnelexperimenten).

Analyse van het zandmonster dat genomen is op de zeereepkruin in het suppletiegebied op Texel toont aan dat een matige korrelgrootte-verdeling een matige verstuiwing tot gevolg heeft, ondanks het feit dat het zand weinig fijn en grof materiaal bevat.

Voor de kwalitatief bepaalde maten voor de korrelgrootte-verdeling (sortering, scheefheid en de kurtosis) geldt: stuifgevoelig zand is goed tot zeer goed gesorteerd, heeft een zeer kleine (bijna symmetrische verdelingskromme) of positieve scheefheid (fijne staart in de verdelingskromme) en is leptokurtic (puntige verdelingskromme). Deze eigenschappen zijn voor veel monsters in de referentiegebieden gevonden (Bijlage 3). Het onderzochte suppletiezand is redelijk tot redelijk goed gesorteerd, met een negatieve scheefheid (grote staart in de verdelingskromme), veelal veroorzaakt door de aanwezigheid van schelpen, en soms platykurtic (vlakke verdelingskromme). Twee uitzonderingen hierop zijn: de suppletie Texel, Eierland uit 1994 (U is laag, goed gesorteerd, zeer kleine scheefheid) en de suppletie Camperduin-Egmond uit 1992 (U is laag, zeer goed gesorteerd, fijne staart in de verdelingskromme). De hoge stuifgevoeligheid van deze twee suppleties kan hieruit worden verklaard.

- Hoeveelheid zeer fijn materiaal ($< 75 \mu\text{m}$)

Er is een negatief effect op de verstuiwing verwacht van klei, silt en organische stof. Hoewel de gehalten hiervan niet apart zijn gemeten, is wel de gewichtsfractie zeer fijne delen ($< 75 \mu\text{m}$) bepaald (Figuur 11). Deze is zeer hoog bij de suppleties op Ameland en Schouwen. Beide suppleties hebben een vrij lage stuifgevoeligheid getuige de windtunnelexperimenten. Omdat de drie suppleties ook een groot aandeel schelp(fragment)en bevatten, is de invloed van fijn materiaal (dat klei, silt en organische stof bevat) op de verstuiwing niet duidelijk. In de praktijk zal dit gecombineerde effect echter ook optreden, doordat schelprijk materiaal vaak samen voorkomt met slibrijk materiaal, omdat het slib tijdens de afzetting de hoeveelheid voedsel voor de schelpdieren heeft bepaald (Eisma, 1968).

Uit de grafiek in Figuur 11 kan worden afgelezen dat een gewichtspercentage fijne delen van minder dan 0.05% geen invloed op de stuifgevoeligheid lijkt te hebben.

- Hoeveelheid grof materiaal ($> 600 \mu\text{m}$)

Zand met meer dan 6% in de fractie $> 600 \mu\text{m}$ stuift minder dan 45% tijdens windtunnelexperimenten, zand met minder dan 3% grof materiaal stuift voor meer dan 55% van het totaal ingewogen zand. Zand met een gewichtspercentage van meer dan 20% in de fractie $> 600 \mu\text{m}$ stuift minder dan 20% tijdens de windtunnelproeven (Figuur 11). De fractie $> 2000 \mu\text{m}$ is in het laatste geval bepalend: deze maakt tot 32% van het gewichtstotaal uit, tegen maximaal 5% in de fractie 600-2000 μm (Figuur 11).

Het grove materiaal bestaat over het algemeen uit schelpen en schelpfragmenten. Tijdens de windtunnelexperimenten zijn afdekkende schelpenlagen gevormd, waarbij in extreme gevallen (namelijk bij zand van de suppletie uit 1990 op Ameland) de verstuiwing zelfs geheel is gestopt.

In natuurlijke omstandigheden worden schelpen op het strand steeds door de werking van de zee omgewoeld, zodat weer zand aan het oppervlak komt. Door verstuiwing bij normale windsnelheden zullen niet veel schelpen het droge strand op worden geblazen (hoewel de

fractie 600-2000 μm zich wel kruipend over het oppervlak kan verplaatsen). Bij zandsuppleties ligt dat vaak anders: als het strand is verhoogd tot boven de GHW-lijn worden de schelpenvloertjes slechts onderbroken door betreding of tijdens storm. Schelpenvloertjes in duinsuppleties en banketten worden zelden onderbroken. Hier kan de verstuiwing geheel tot stilstand komen. Observaties op de buitenduinrandsuppleties op Ameland en Schouwen bevestigen dit.

Uit de proeven met suppletiezand uit Ameland blijkt dat er meer verstuift, naarmate de schelpfragmenten kleiner zijn, ook al is het totale gewichtsgehalte aan schelpen hoger. Het referentiezand uit Schouwen laat zien dat zand met een laag gehalte aan deeltjes groter dan 2000 μm en een hoog gehalte aan deeltjes 600-2000 μm toch maar matig stuift.

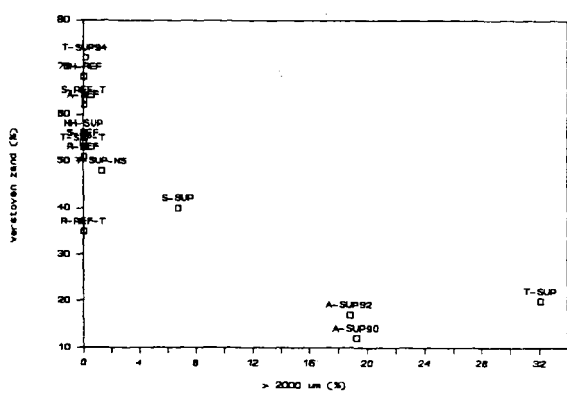
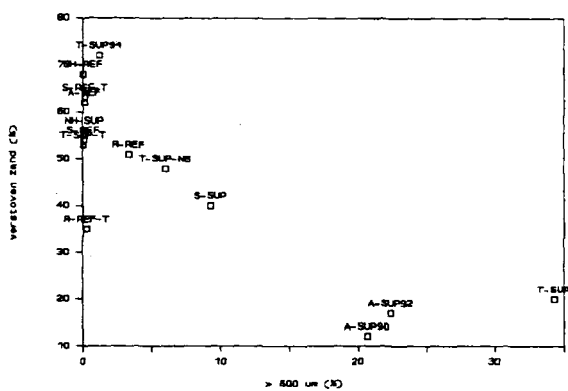
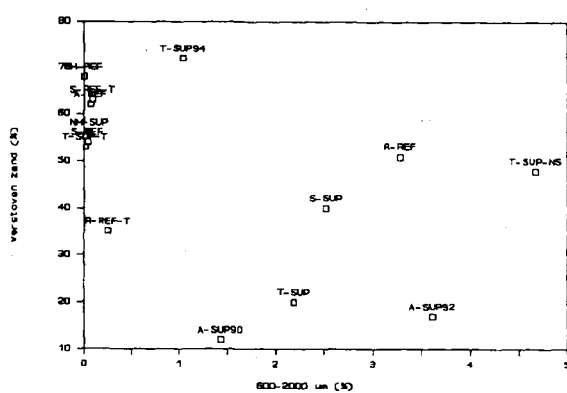
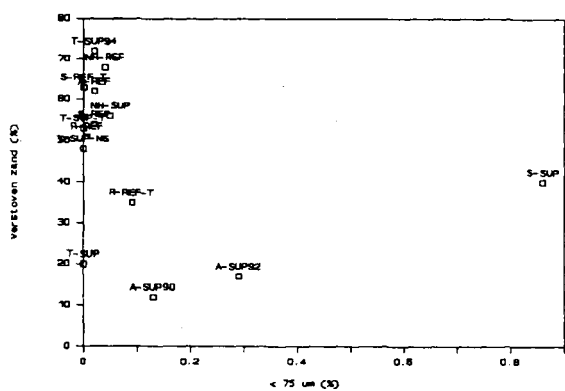
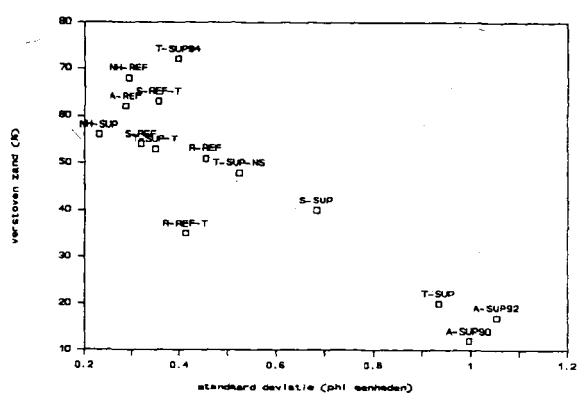
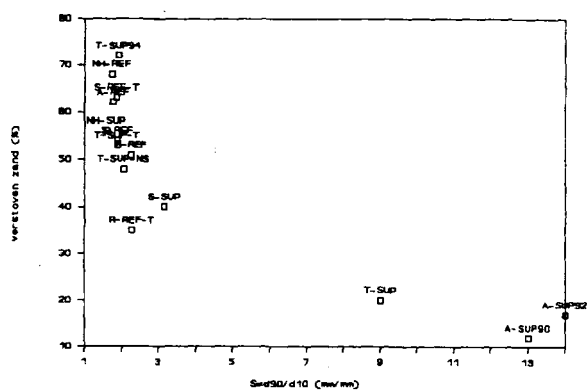
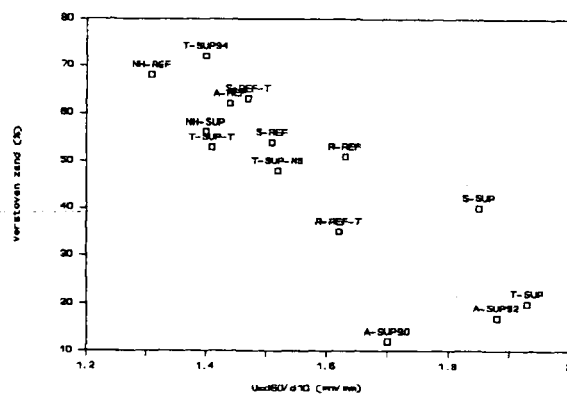
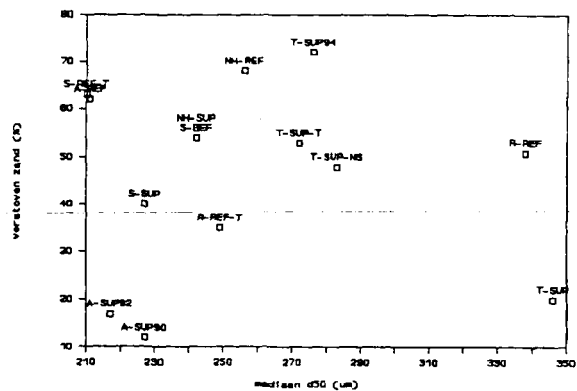
Het zand op Texel bevat naast schelpfragmenten ook grove zandkorrels, grind en stenen, die slecht of niet verstuiwen. De verstuiwing is enigszins vertraagd, maar er is geen afdekkende laag gevormd. De aanwezigheid van grind en stenen is op Texel echter geen gebiedsvreemd verschijnsel.

Aggregaten zijn een derde bron van grof materiaal. Monstermateriaal van de top van de zeereep in Rijnland bevat veel aggregaten van aan zandkorrels verkitte algen. De algen ontwikkelen zich als er nauwelijks zand naar de zeereep stuift. Zelfs een klein gewichtspercentage aggregaten van zand en algen in het monster (0.25%) kan ervoor zorgen dat er tijdens windtunnelexperimenten weinig zand verstuift.

Tot slot moet worden opgemerkt dat de korrelgrootte-verdeling van enkele monsters beïnvloed is tijdens de behandeling in het laboratorium. Tijdens het drogen van het monstermateriaal van het natte strand op Texel zijn enige aggregaten gevormd (waarschijnlijk mede onder invloed van zouten). Bij enkele monsters van het suppletiezand van Schouwen is tijdens het drogen slib verhard. Het monstermateriaal van de suppletie op Schouwen bevatte daarnaast (al voor drogen) enige brokjes fijn materiaal van ongeveer een centimeter in doorsnede.

Figuur 11 (zie volgende pagina). Invloed van de 'stuijparameters' op de stuijgevoeligheid van zand. De parameters zijn door middel van korrelgrootte-analyse bepaald (zie Bijlage 3). De stuijgevoeligheid is uitgedrukt in procenten van het tijdens windtunnelproeven aan de wind blootgesteld materiaal (zie Bijlage 5). De volgende monsters zijn onderzocht:

- A-REF: Ameland: Midden, referentie, strand, RSP 8.4
- A-SUP90: Ameland: Midden, suppletie 1990, RSP 15.0
- A-SUP92: Ameland: Midden, suppletie 1992, RSP 12.2
- T-SUP-NS: Texel: Eierland, suppletie, nat strand, RSP 26.6
- T-SUP: Texel: Eierland, suppletie, droog strand, RSP 26.6
- T-SUP-T: Texel: Eierland, zeereepkruin, RSP 26.6
- T-SUP94: Texel: Eierland: suppletie 1994, RSP 27.4
- NH-REF: Noord-Holland: Camperduin-Egmond, referentie, RSP 30.25
- NH-SUP: Noord-Holland: Camperduin-Egmond, suppletie 1992, RSP 32.4
- R-REF: Rijnland, Meijendel: referentie, strand, RSP 93.5
- R-REF-T: Rijnland, Meijendel: referentie, zeereepkruin
- S-REF: Schouwen: Kop, referentie, strand, RSP 10.44
- S-REF-T: Schouwen: Kop, referentie, klif, RSP 13.55
- S-SUP: Schouwen: Kop, suppletie 1991, RSP 13.55.



Het belang van de materiaaleigenschappen voor de stuifgevoeligheid van suppletiezand

Uit het onderzoek is gebleken dat schelpen (en in mindere mate andere zeer grove bestanddelen) inderdaad dominant zijn in het verstuiwingsproces. De mediaan wordt zo sterk bepaald door de korrelgrootte-verdeling (met inbegrip van het gehalte aan zowel zeer fijn als zeer grof materiaal), dat er geen directe relatie is met de stuifgevoeligheid. De relatie tussen korrelgrootte-verdeling en stuifgevoeligheid is duidelijk: hoe slechter het zand gesorteerd is, hoe geschikter het is voor compactie en hoe minder stuifgevoelig het is. Een hoog gehalte aan fijne delen (naast silt ook (nog) niet onderzocht klei en in mindere mate ook organische stof) draagt bij aan deze slechte sortering, maar kan ook invloed uitoefenen via een groter vochtvasthoudend vermogen en een grotere cohesie. Hoewel een combinatie van factoren de stuifgevoeligheid bepaalt, met name in schelparm zand, kan de verachte volgorde van belangrijkheid (zie paragraaf 2.3) veranderd worden in:

- schelpen
- korrelgrootte-verdeling
- fijne delen (met name klei, maar ook silt en organische stof)
- mediaan.

De andere genoemde factoren zijn niet onderzocht, maar kunnen wel van invloed zijn op de stuifgevoeligheid.

Het aandeel van elk van de factoren op de stuifgevoeligheid kan nader worden onderzocht door windtunnelproeven met vooraf vastgestelde mengsels (met een breed spectrum aan korrelgrootte-verdelingen, gehalten aan klei etc.) uit te voeren (zie paragraaf 6.1).

Stuifgevoeligheid per suppletie

Per suppletie is de stuifgevoeligheid samengevat, met uitzondering van de suppletie bij het Zwanenwater, waar niet voldoende gegevens van bekend zijn.

- Ameland: Midden-Ameland
Het zand dat is gebruikt voor de suppleties in 1990 en 1992 op Ameland is veel minder stuifgevoelig dan het zand dat oorspronkelijk aanwezig was. Redenen hiervoor zijn de slechte sortering, een hoog gehalte aan fijn materiaal en de aanwezigheid van schelpen, die (met name aan de zeezijde van de zeereep) achterblijven bij deflatie en vervolgens door de vorming van een vloertje verdere verstuiwing verhinderen.
- Texel: Eierland
Het suppletiezand voor de suppleties op Eierland is matig tot zeer stuifgevoelig, afhankelijk van de sortering en het gehalte aan schelpen en in mindere mate de hoeveelheid uiterst grof zand en grind. Het zand van de suppletie in 1994 is zeer stuifgevoelig: het is grof zand, maar goed gesorteerd en daardoor slecht geschikt voor compactie, en cohesieloos. Op het droge strand wordt de verstuiwing wel beperkt door schelpenvloertjes.
- Noord-Holland: Camperduin-Egmond
Het suppletiezand is vrij fijn, goed gesorteerd en slecht geschikt voor compactie. Schelpfragmenten remmen (tijdelijk) de verstuiwing. Hoewel de samenstelling van het suppletiezand die van het oorspronkelijke zand benadert, is het suppletiezand toch iets minder stuifgevoelig dan het zand in het nabijgelegen referentiegebied.
- Rijnland: Meijendel
Het suppletiezand is vergelijkbaar met het zand dat voorafgaand aan de suppletie aanwezig

was. Hoewel er geen windtunnelproeven met het zand zijn uitgevoerd, lijkt het enigszins stuifgevoeliger.

- Schouwen: Kop van Schouwen

De situatie is te vergelijken met die op Ameland. Het zand van de duinfrontsuppletie is slechter gesorteerd en daardoor geschikt voor compactie en bevat meer uiterst fijne delen dan het van nature aanwezige strandzand. Er zijn veel schelpen achtergebleven bij verstuiwing, die een vloertje vormen en verdere verstuiwing vertragen of verhinderen.

2.5.3. Verstuiwing

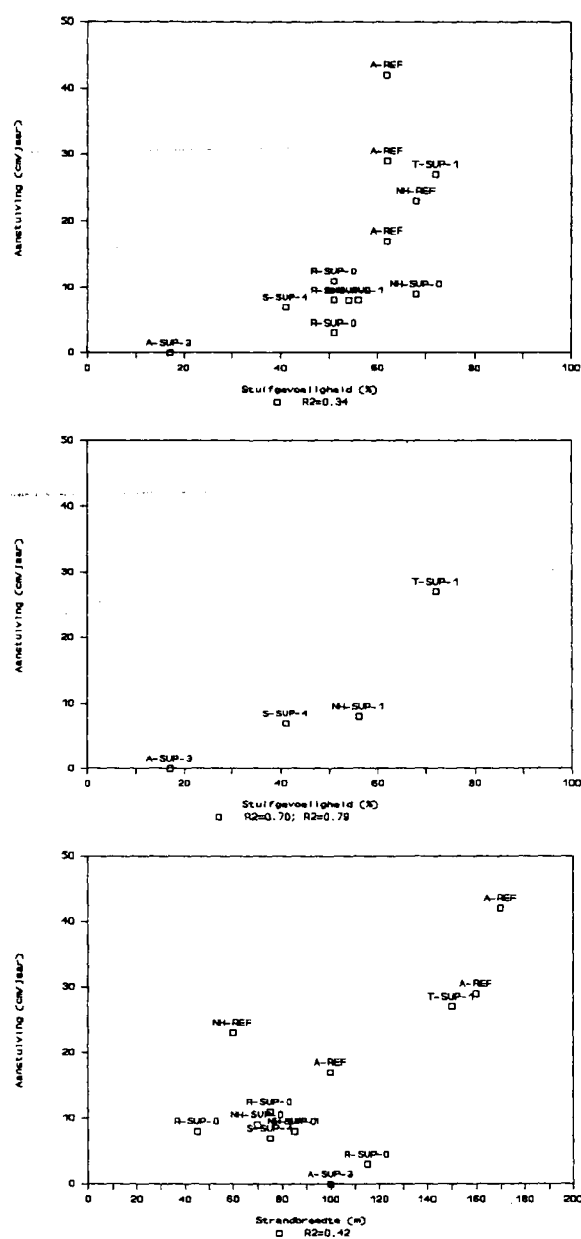
Relaties tussen de stuifgevoeligheid van zand en de verstuiwing

De uit de JARKUS/DONAR-gegevens berekende gemiddelde zandaanvoer is uitgezet tegen de stuifgevoeligheid van zand, zoals dat is gemeten in de windtunnel (Figuur 12). Er is rekening mee gehouden dat de materiaaleigenschappen van het oppervlak van de suppletie veranderen. De monsters zijn genomen in de zomer van 1994, dus in de periode 1994-1995. Daar de JARKUS/DONAR-gegevens waaruit de aanstuiving is berekend slechts tot 1993 voorhanden zijn, is een aantal aannamen gedaan.

Voor Eierland op Texel is zand van de suppletie van 1994 bemonsterd; aangenomen wordt dat dit zand vergelijkbaar is met het suppletiezand uit 1990 en dat de aanstuiving in de periode 1990-1991 ($N=1$) gekoppeld mag worden aan de stuifgevoeligheid van het suppletiezand uit 1994 ($N=1$). Voor Noord-Holland, Camperduin-Egmond is een onbewerkt monster genomen ($N=1$), dat te relateren is aan de aanstuiving direct na de suppletie van 1990 (periode 1990-1991) zowel als die van 1992 (1992-1993). Van de suppleties op Ameland en Schouwen is oppervlakte-materiaal bemonsterd, waarbij differentiële aanrijking heeft plaatsgevonden. Net als bij Texel is aangenomen dat op Ameland het zand uit 1990 en 1992 en op Schouwen het zand uit 1987 en 1991 een zelfde korrelgrootte-verdeling kennen, zodat de materiaaleigenschappen van het zand van de laatstgenoemde suppletie kunnen worden vergeleken met de aanstuiving van het zand van de eerstgenoemde suppletie.

Als referentie kan men kiezen voor de aanstuiving in het referentiegebied met de stuifgevoeligheid van zand uit het referentiegebied. Ook kan de aanstuiving in de periode voor suppletie in het suppletiegebied ($N=0$) worden uitgezet tegen de stuifgevoeligheid van zand in het referentiegebied. De berekende aanstuiving in jaren met raaien die waarschijnlijk ofwel te hoog ofwel te laag zijn ingemeten (bijvoorbeeld Schoorl, 1990-1991) is weggelaten.

Er is een trend van toenemende aanstuiving met grotere stuifgevoeligheid, met R^2 is 0.34 voor een lineaire regressie. Deviaties van deze trendlijn komen dus voor, vooral als gevolg van temporele fluctuaties in de aanstuiving (bijvoorbeeld in het referentiegebied op Midden-Ameland). Met name de vier waarnemingen in de suppletiegebieden (Figuur 12b), met $R^2=0.70$ voor een lineaire regressie en $R^2=0.79$ voor een kwadratische regressie, bekrachten de veronderstelling dat de stuifgevoeligheid van invloed is op de aanstuiving van suppletiezand en dus op de profiel- en vegetatieontwikkeling in de zeereep.

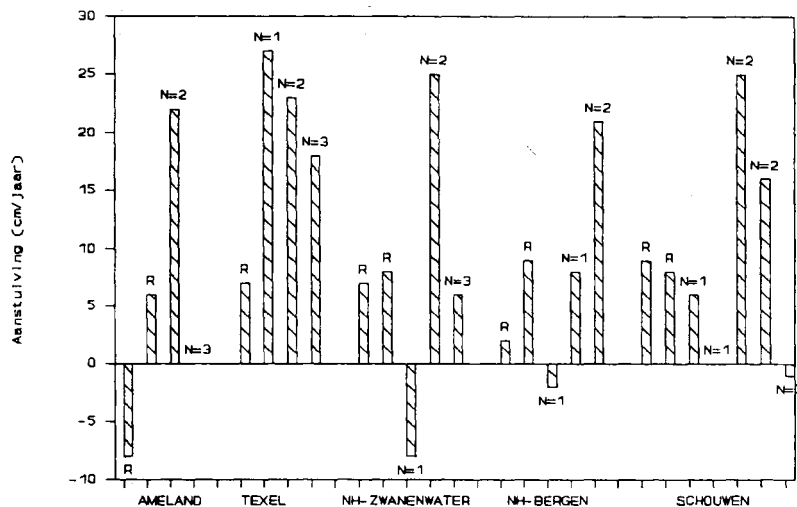


Figuur 12. Verband tussen stuifgevoeligheid van zand en gemiddelde aanstuiving naar de zeereepkruin en verband tussen de breedte van het strand en de aanstuiving voor vijf gebieden. Gekozen is voor de volgende punten:

	plaats	stuifgevoeligheid	aanstuiving
A-SUP-3	Ameland, Midden, suppletie	A-SUP92 (N=3): 17%	suppletie 1990, 1992-1993 (N=3): 0 cm/j
A-REF	Ameland, Midden, referentie	A-REF (N=0): 62%	referentie, 1990-1991 (N=0): 29 cm/j
A-REF	Ameland, Midden, referentie	A-REF (N=0): 62%	referentie, 1991-1992 (N=0): 42 cm/j
A-REF	Ameland, Midden, referentie	A-REF (N=0): 62%	referentie, 1992-1993 (N=0): 17 cm/j
T-SUP-1	Texel, Eierland, suppletie	T-SUP94 (N=1): 72%	suppletie 1990, 1990-1991 (N=1): 27 cm/j
NH-SUP-1	Noord-Holland, suppletie	NH-SUP (N=1): 56%	suppletie 1992, 1992-1993 (N=1): 8 cm/j
NH-SUP-0	Noord-Holland, referentie	NH-REF (N=0): 68%	suppletie, 1989-1990 (N=0): 9 cm/j
NH-REF	Noord-Holland, referentie	NH-REF (N=0): 68%	referentie, 1992-1993 (N=0): 23 cm/j
R-SUP-0	Rijnland, suppletie	R-REF (N=0): 51%	suppletie, 1990-1991 (N=0): 8 cm/j
R-SUP-0	Rijnland, suppletie	R-REF (N=0): 51%	suppletie, 1991-1992 (N=0): 11 cm/j
R-SUP-0	Rijnland, suppletie	R-REF (N=0): 51%	suppletie, 1992-1993 (N=0): 3 cm/j
S-SUP-4	Schouwen, suppletie	S-SUP (N=4): 41%	suppletie 1987, 1990-1991 (N=4): 7 cm/j
S-SUP-0	Schouwen, referentie	S-REF (N=0): 54%	suppletie, 1986-1987 (N=0): 8 cm/j.

Het belang van de overige factoren op de verstuiving

Variatie in aanstuiving is niet alleen het gevolg van verschillen in stuifgevoeligheid van suppletie-zand maar kan ook het gevolg zijn van bijvoorbeeld fluctuaties in de stormfrequentie, verdeling van de windrichtingen, hoeveelheid neerslag en golfklimaat en grootschalig zandtransport, waardoor niet ieder jaar evenveel zand kan aanstuiven. Door de aanstuiving van zand van suppleties van verschillende jaren met elkaar te vergelijken, wordt deze variatie de 'ruis' van de effecten van zandsuppleties. Naast materiaaleigenschappen kunnen vorm en plaats van de zandsuppletie en de ermee samenhangende veranderingen in de topografie en vochtcondities een rol spelen bij de verstuiving.



Figuur 13. Aanstuiving in vijf suppletie-gebieden:

a. Ameland, Midden, suppletie 1990:

R: 1988-1989; R: 1989-1990; N=1: 1990-1991; N=2: 1991-1992; N=3: 1992-1993,

b. Texel, Eierland, suppletie 1990:

R: 1989-1990; N=1: 1990-1991; N=2: 1991-1992; N=3: 1992-1993,

c. Noord-Holland, Zwanenwater, suppletie 1987:

R: 1985-1986; R: 1986-1987; N=1: 1987-1988; N=2: 1988-1989; N=3: 1989-1990,

d. Noord-Holland, Camperduin-Egmond, suppleties 1990 en 1992:

R: 1988-1989; R: 1989-1990; N=1: 1990-1991; N=1: 1992-1993; N=2: 1991-1992,

e. Schouwen, Kop, suppleties 1987 en 1991:

R: 1985-1986; R: 1986-1987; N=1: 1987-1988; N=1: 1991-1992; N=2: 1988-1989;

N=2: 1992-1993; N=3: 1990-1991,

met R is de periode voorafgaand aan suppletie (referentie), N=1 is de periode tot een jaar na suppletie, N=2 is het tweede jaar na suppletie en N=3 is de periode drie jaar na suppletie.

Figuur 13 toont de aanstuiving naar de zeereep top in vijf suppletiegebieden respectievelijk voorafgaand aan suppletie en één, twee en drie jaar na suppletie.

Op Texel lijkt zandsuppletie een positief effect te hebben gehad op de hoeveelheid naar de zeereep verstoven zand. De hoge stuifgevoeligheid, maar ook het feit dat het strand breder is en dat de vochtcondities gunstiger zijn voor zandtransport kunnen hier de oorzaak van zijn.

Zowel op Ameland, bij het Zwanenwater, bij Bergen en op Schouwen is de aanstuiving na twee

jaar mogelijke verstuiwing van suppletiezand groot, over het algemeen significant hoger dan voorafgaand aan de suppletie en één en drie jaar na suppletie, ongeacht de stuifgevoeligheid van het zand. Dit wijst erop dat zandsuppletie ook andere factoren aanstuurt die van invloed kunnen zijn op de hoeveelheid verstuiwend zand. Na drie jaar (mogelijke) aanstuiving van suppletiezand lijkt er nauwelijks zandaanvoer te zijn op Ameland en op Schouwen. Mogelijk zijn na drie jaar schelpenvloertjes ontwikkeld die verdere verstuiwing tegengaan, en zelden worden onderbroken omdat ze op beide lokaties niet door de zee bereikt kunnen worden. Hoe het komt dat de aanstuiving op N=2 hoger is dan op N=1 is niet duidelijk. Mogelijk stuift het suppletiezand pas het tweede jaar goed, omdat het zand dan ontzilt is, hetgeen ongeveer een half jaar duurt (VOOGT, 1988).

Uit de figuur blijkt het belang ook andere aspecten van zandsuppleties bij het onderzoek te betrekken, zoals topografie en de beschikbaarheid van zand, bodemvochtgehalte en grondwaterstroming. In Figuur 12c is een aanzet hiertoe gegeven. De breedte van het strand (d.i. de afstand van de NAP-lijn tot de duinvoet), die is afgelezen uit de JARKUS-profielen, is uitgezet tegen de gemiddelde aanstuiving. Er moet rekening worden gehouden met seizoensverschillen, daar het zomerprofiel anders is dan het winterprofiel (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1988). Niet altijd neemt de aanstuiving toe met het breder worden van het strand en dus met het toenemen van de beschikbare hoeveelheid zand ($R^2=0.42$). Uitzonderingen zijn het referentiegebied bij Schoorl, waar de zeereepkruin ondanks een geringe strandbreedte sterk ophooft, het referentiegebied Meijndel in Rijnland, dat bekend staat om zijn geringe dynamiek en Midden-Ameland, waar drie jaar na suppletie de stuifgevoeligheid mogelijk doorslaggevend is voor de aanstuiving.

Verstuiwing per suppletie

Van de gebieden, waarvan ook de stuifgevoeligheid is bepaald, worden hieronder de effecten van zandsuppletie op de aanstuiving gegeven.

- Ameland: Midden-Ameland
Twee jaar na suppletie komt er veel zand aan de zeereep ten goede (gemiddeld 22 cm/j), meer dan er voorafgaand aan de suppletie is aangestoven. De oorzaak is niet bekend. Het jaar erna (N=3) is de gemiddelde aanstuiving tot nul gereduceerd, hetgeen echter niet ongebruikelijk is in het kustvak.
- Texel: Eierland
Op Eierland op Texel neemt de aanstuiving direct na suppletie sterk toe. Na een jaar (N=1) is er sterke verstuiwing (27 cm/j), die afneemt en na N=3 nog 18 cm/j bedraagt. Mogelijk zal de aanstuiving erna verder afnemen. Een indicatie hiervoor wordt gegeven door de windtunnelproef van zand van het droge strand, bemonsterd op N= 4 na de suppletie in 1990: er is slechts 20% verstoven, voornamelijk als gevolg van een hoog (residueel) schelpgehalte. Het lijkt erop dat de verhoging van de aanstuiving het gevolg is van zandsuppletie.
- Noord-Holland: Camperduin-Egmond
Het eerste jaar na suppletie (N=1) stuift er bij Bergen evenveel aan als voorafgaand aan de suppletie (tot 9 cm/j). Het tweede jaar nadat de zandsuppletie is opgebracht (N=2), verstuift er aanzienlijk meer zand richting zeereepkruin (21 cm/j). De hoeveelheid aangestoven zand is dan te vergelijken met de aanstuiving in het referentiegebied bij Schoorl.
- Schouwen: Kop van Schouwen

Een jaar na de suppleties stuift er niet significant minder zand aan (0 tot 6 cm/j op N=1) dan voorafgaand aan de suppleties (7 tot 8 cm/j), maar net als op Ameland is de aanstuiving in de periode twee jaar na de suppletie groot (16 tot 25 cm/j). Drie jaar nadat de suppletie is opgebracht (N=3) stuift er weinig zand naar de zeereepkruin (< 0 cm/j), hetgeen niet uitzonderlijk is voor dit gebied.

3. HELMVITALITEIT EN SOORTENSAMENSTELLING

3.1. Materiaal en methoden

3.1.1. Algemene aanpak vegetatiekundig deelonderzoek

Bij het vegetatiekundig deelonderzoek is nagegaan wat de effecten zijn van zandsuppleties op de helmvitaliteit en de soortensamenstelling in de zeereep. Uitgegaan is van het gegeven dat door zandsuppleties zowel de hoeveelheid als de samenstelling van het aangevoerde zand kan worden beïnvloed. Door middel van een literatuurstudie is nagegaan wat bekend is van de relatie tussen hoeveelheid en samenstelling van het aangevoerde zand en de helmvitaliteit c.q. soortensamenstelling. Vervolgens is op grond van deze gegevens een verwachting opgesteld voor de ontwikkeling van de helmvitaliteit en soortensamenstelling voor vier scenario's van mogelijke ontwikkelingen na zandsuppletie: stagnatie van de zandaanvoer (0-5 cm per jaar), normaal, maar geringe zandaanvoer (5-20 cm per jaar), normaal, maar aanzienlijke zandaanvoer (20-80 cm per jaar) en extreme zandaanvoer (> 80 cm per jaar).

Na deze theoretische fase is aan de hand van veldgegevens nagegaan of, en zo ja wat voor effecten van zandsuppletie op de helmvitaliteit en soortensamenstelling worden waargenomen. Hiertoe is langs ruim 80 km van de Nederlandse kust in suppletie en niet-suppletiegebieden de helmvitaliteit en de soortensamenstelling bepaald en zijn de gegevens met behulp van verwerkingsprogramma's geanalyseerd. Vervolgens zijn de veldgegevens gekoppeld aan de zandaanvoergegevens die uit de data van het JARKUS/DONAR-bestand zijn berekend, zoals die in hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd. Op grond hiervan is nagegaan of de mate van zandaanvoer volgens het JARKUS/DONAR-bestand correleert met de helmvitaliteit of met de aanwezigheid van plantensoorten uit groepen met een verschillende levensstrategie. Met deze gegevens zijn de verwachtingen getoetst. Tot slot is een voorstel uitgewerkt voor monitoring van de effecten van zandsuppleties op de helmvitaliteit en de soortensamenstelling en zijn kennisleemten geformuleerd.

3.1.2. Literatuurstudie en verwachtingen

De literatuurstudie is uitgevoerd aan de hand van bij het NIOO beschikbare informatie, aangevuld met literatuurreferenties die voor het doel van dit onderzoek verzameld zijn. In het rapport is de meest relevante informatie verwerkt. De nadruk heeft gelegen op ontwikkelingen in de vegetatie van zeewerende duinen in relatie tot de mate van zandaanvoer en de samenstelling van het aangevoerde zand.

Op grond van de informatie uit het literatuuronderzoek zijn verwachtingen opgesteld voor de ontwikkeling van de helmvitaliteit en de soortensamenstelling gegeven de vier in paragraaf 3.1.1 genoemde scenario's. Voor de soortensamenstelling is de vegetatie ingedeeld in soorten met verschillende levensstrategie, omdat binnen elke levensstrategie naar verwachting de respons van de verschillende soorten sterke overeenkomst vertoont.

3.1.3. Veldwerk en dataverwerking

Bemonsteringsschema

Van nature is er reeds een grote variatie in de vegetatie van de zeereep. Deze variatie wordt veroorzaakt door bodem- en klimaatsfactoren. Het is bijvoorbeeld bekend dat de Waddeneilanden kalkarm zijn, de kust ten noorden van Bergen is betrekkelijk kalkarm en de kust ten zuiden van

Bergen is kalkrijk. Tevens zijn er verschillen als gevolg van macro-klimaatverschillen (Wadden versus Zeeland) en van micro-klimaatverschillen als gevolg van expositie en hellingshoek. Bovendien kunnen er seizoensafhankelijke verschillen zijn.

In het ideale geval zouden zoveel mogelijk onafhankelijke vegetatie-opnamen gemaakt moeten worden. Dat wil zeggen, dat verspreid langs de kust op een groot aantal plaatsen vegetatie-opnamen gemaakt worden, waarbij gestreefd wordt naar een gelijke representatie van gesuppleerde kustgedeelten en ongesuppleerde kustgedeelten per groter gebied. Door min of meer toevallige factoren kan het voorkomen dat bepaalde soorten langs een deel van de kust veel abundanter zijn dan elders. Voorbeelden hiervan zijn gebieden met hoge abundantie van zeeraket (*Cakile maritima*) of akkerdistel (*Cirsium arvense*). Wanneer in zulke gebieden variatie in suppletie ontbreekt, kan een dergelijk min of meer toevallig verschil leiden tot de onterechte conclusie dat de abundantie van de betreffende soort beïnvloed wordt door suppletie. Door het aantal opnamen per sectie langs de kust evenredig te verdelen over alle mogelijke omgevingscombinaties van omgevingsfactoren leiden dergelijke toevallige verschillen minder snel tot verkeerde conclusies door het ontbreken van ruimtelijke autocorrelatie in de set van bemonsteringen. Tevens zouden de vegetatieopnamen per seizoen verdeeld moeten worden over de verschillende kustgedeelten om seizoensinvloeden uit te sluiten.

Boven geschetste werkwijze stuit echter op ernstige logistieke bezwaren, daar reistijd en reiskosten onevenredig toenemen, terwijl de bemonsteringsinspanning afneemt. Er is daarom gekozen voor een minder elegante, maar statistisch niet tot onoverkomelijke bezwaren leidende methode. Secties langs de kust, waarin zowel gesuppleerde als ongesuppleerde gedeelten voorkomen werden in gedeelten van 250 meter bemonsterd. Voor verschillen als gevolg van klimaatverschillen, seizoensverschillen en verschillen in bodem factoren wordt tijdens de analyse (zie aldaar) gecorrigeerd. Daar gesuppleerde kustgedeelten in het algemeen veel langer zijn (enkele kilometers) dan de gekozen lengte van de vegetatie-opnamen (200 of 250 meter per opname) moet echter ruimtelijke autocorrelatie, die zou kunnen leiden tot onterechte significantie van suppletieeffecten, niet uitgesloten worden.

Onderzoekslocaties

De veldopnamen zijn gemaakt in de maanden juli, augustus en september 1994 op Ameland, Vlieland, Texel, bij Bergen, Zandvoort, Noordwijk en op Goeree, Schouwen en Walcheren. Zeeuws-Vlaanderen is ook bezocht, maar viel af omdat overal het onderste deel van de zeereep van asfalt was. Strandopgangen en de duinen achter strandpaviljoens zijn in verband met mogelijke verstoring niet meegenomen. In Tabel 1 staan de precieze lokaties waar de opnamen gemaakt zijn.

De vegetatieopnamen

Voor het verrichten van de opnamen is steeds eerst een algehele indruk van het terrein opgedaan door een stuk over de zeereep te lopen. Vervolgens is heen over de top en terug langs de duinvoet gelopen om de opname te kunnen verrichten, indien nodig is er ook op de helling nauwkeuriger gekeken. Er is per vak tussen twee strandpalen (200 of 250 meter) een schatting ingevuld voor alle waargenomen plantesoorten volgens de abundantieschaal van Tansley (Tabel 2).

Tegelijkertijd is per raaiwak de helmvitaliteit opgenomen volgens de schattingsschaal uit Tabel 3.

Tabel 1. De lokaties waar de vegetatieopnamen gemaakt zijn.

Kustvak	Lokatie	Suppletie	Raai (decameters)
Ameland	Bornrif	geen (referentie)	200-600
	Ameland-midden	geen (referentie)	800-1000
	Ameland-midden	1990/1992	1260-1320
	Ameland-midden	1990/1992	1540-1600
	Ameland-midden	1992	1600-1800
Vlieland	Vlieland-midden	geen (referentie)	4700-5020
Texel	de Hors	geen (referentie)	800-900
	Texel-zuidwest	1993	940-1260
	De koog	1991	2020-2300
Noord-Holland	Bergen aan Zee	1990/1992	3120-3720
	Zandvoort-Bloemendaal	1990/1994	5800-6200
Rijnland	Noordwijk	geen (referentie)	7900-8025
Goeree	Kwade hoek	geen (referentie)	600-800
Schouwen	Noorderstrand	1994	100-300
	Schouwen-kop	ref/1991	940-1340
		1991	1520-1700
Walcheren	Domburg	1990/1992	1260-1520
	Domburg	1990/1992	1560-1800
	Westkapelle-Zoutelande	1990/1991/1992	2300-2620
	Zoutelande-Vijgeter	1992	2720-2940

Tabel 2. Codes voor de bij de veldopnamen gebruikte Tansleyschaal.

- 1 = de soort is zeer zeldzaam, slechts enkele exemplaren aanwezig
- 2 = de soort is zeldzaam (5 tot 10 exemplaren per 200 of 250 m)
- 3 = de soort is (vrij) schaars, af en toe, hier en daar voorkomend (10 tot 50 exemplaren per 200 of 250 m)
- 4 = de soort is minder talrijk, maar (nog) niet schaars (meer dan 50 exemplaren per 200 of 250 m)
- 5 = abundant: soort is zeer veel aanwezig, maar nooit co-dominant
- 6 = co-dominant: soort overheerst samen met andere soorten
- 7 = dominant: soort overheerst

Tabel 3. Schattingsschaal voor de helmvitaliteit.

- 0 = niet aanwezig
- 1 = zwaar degenererend
- 2 = degenererend
- 3 = vitaal
- 4 = zeer vitaal

De helmvitaliteit is op de duinvoet, het midden van de zeewaartse helling en de top van de zeereep afzonderlijk geschat. Op de meeste plaatsen waren deze stadia goed te onderscheiden, alhoewel soms met name de definitie van de top verwarring gaf als zich een nieuwe regel voor de



Foto 1. Zwaar degenererende helm



Foto 2. degenerende helm



Foto 3. Vitale helm.



Foto 4. Zeer vitale helm

oude aan het vormen was. Vrijwel altijd is dan de meest zeewaarts gelegen top genomen.

Milieuvariabelen

Aan de hand van de gegevens van het JARKUS/DONAR-bestand zijn per veldopname twee raaien vanaf 0 meter boven NAP tot de eerste duintop afgedrukt. Uit de figuren is de hoogte van de duintop ten opzichte van NAP, de hoogte ten opzichte van de duinvoet en de 'breedte' van het duin afgelezen. Door het duin als driehoek te zien, is vervolgens de hellingshoek en lengte van de duinvoet tot de top berekend (bijlage 9). De uiteindelijke waarden zijn steeds gemiddelden van de twee raaien.

Het was de bedoeling aan de hand van het JARKUS/DONAR-bestand de gemiddelde zandaanvoer als correlatiefactor in de analyse mee te nemen. Het was echter niet mogelijk in de beschikbare tijd de gegevens te verkrijgen. In § 2.5.3 wordt geconcludeerd dat zandinstuiving positief correleert met de strandbreedte (alhoewel uiteraard een aantal andere milieufactoren ook van invloed is op de zandinstuiving). Voor de analyse van de veldgegevens is daarom als indirecte factor voor de zandaanvoer de strandbreedte meegecorreleerd. De strandbreedtes zijn afgeleid uit het rapport 'De basiskustlijn, een technisch/morfologische uitwerking' (Hillen et al., 1991), door steeds per raaiwak de afstand tussen de duinvoet en de gemiddelde laagwaterlijn van de twee begrenzendende raaien te middelen.

De voor correlatie met de veldgegevens van het vegetatie-onderzoek gebruikte strandbreedtes zijn zodoende niet dezelfde als die gebruikt zijn voor het geomorfologisch deelonderzoek (§ 2.5.3).

Aan de hand van de door het RIKZ verstrekte gegevens is voor de zandsuppleties het jaar van uitvoeren aangegeven, waaruit de 'leeftijd' van de zandsuppletie kan worden afgelezen. Voor de referentievakken is dit een '0'.

De expositie van het vak is met een kompas in het veld gemeten.

Op grond van de indeling van de Nederlandse kust in een kalkarm, een intermediair en een kalkrijk district zijn codes weergegeven voor kalkrijkdom:

- 1 = kalkrijk
- 0 = kalkarm
- 2 = overgangsgebied (bij Bergen aan Zee)

Over de mate van beheersintensiteit zijn codes ingevoerd voor verschillende beheersvormen volgens Arens (1994):

- | natuurlijkheid | beheer |
|-----------------------------|---|
| 0 = natuurlijk | geen, erg weinig |
| 1 = semi-natuurlijk | stuifschermen, helm poten |
| 2 = semi-natuurlijk | strandsuppletie, rollende zeereep of stuifdijk |
| 3 = gedeeltelijk natuurlijk | op kleine schaal egaliseren |
| 4 = onnatuurlijk | stabilisatie |
| 5 = onnatuurlijk | egalisatie, aanpassing van de helling |
| 6 = onnatuurlijk | op lange termijn veelvuldige egalisatie |
| 7 = gedeeltelijk kunstmatig | op lange termijn veelvuldige aanpassing van de helling of zeereep |
| 8 = kunstmatig | compleet gehermodelleerd of gereconstrueerde zeereep |

Transformatie van de milieuvariabelen

De in het veld genoteerde milieuvariabelen zijn voorafgaand aan de analyse opnieuw gecodeerd en een aantal nominale variabelen werd toegevoegd om te kunnen corrigeren voor lokatie-afhankelijke verschillen in vegetatie-samenstelling, die het gevolg zijn van verschillen in niet gemeten bodem- en klimaatsfactoren.

- Expositie

Daar expositie weergegeven was door een hoek, wordt interpretatie ten zeerste bemoeilijkt: 0° en 360° geven immers dezelfde hoek weer, verhoudingen en verschillen tussen hoeken zijn betekenisloos. Voor een eenvoudige interpretatie is het wenselijk dat de verschillende windrichtingen voor de expositie in de analyse direct weergegeven kunnen worden. De hoeken zijn daarom vervangen door conjoint gecodeerde variabelen die de windstreken weergeven: steeds is aan de dichtstbijzijnde windrichting (N, NNO, NO, ONO, O, OZO etc.) de waarde 2 toegekend en aan de beide richtingen daarnaast de waarde 1. Daar tijdens de analyse is gebleken dat zeer veel expositievariabelen bijdroegen aan de verklaring van verschillen, zijn de zestien windrichtingen vervangen door gesommeerde variabelen: Snoord is de som van de variabelen WNW tot en met ONO, SNO de som van de variabelen NNW tot en met OZO etc. Zulke variabelen geven de 'mate van noordelijkheid (resp. noordoostelijkheid etc.)' aan.

- Gebied

Voor de niet gemeten verschillen in bodem- en klimaatsfactoren zijn voor de verschillende gebieden dummy (0/1) variabelen gemaakt: Waddeneilanden, Zeeland en Noord-Holland. De Waddeneilanden en Zeeland zijn ook nog opgedeeld per eiland en Noord-Holland is opgedeeld per sectie langs de kust (NH3 is bij Bergen, NH56 is bij Zandvoort en NH78 is bij Noordwijk).

- Zandsuppletie

Zandsuppletiejaren zijn hergecodeerd met behulp van zes variabelen waarvan vier dummies (0/1).

- a. tijdna: de tijd na suppletie. Voor ongesuppleerde secties is arbitrair 9 jaar na suppletie ingevoerd.
- b. N-supp: het aantal bekende suppleties gedurende de laatste tien jaar.
- c. 1 jr na, 2 jr na, 3 jr na: drie dummy variabelen om groepen opnamen te vormen uit gebieden die één, twee en drie jaar voorafgaand aan de vegetatieopname voor het laatst gesuppleerd zijn.
- d. geensup: een dummy variabele om de groep niet-gesuppleerde gebieden te kunnen onderscheiden van de gesuppleerde gebieden.

- Overige variabelen

Het kalkgehalte is hergecodeerd om de volgorde logischer te maken: 0=kalkarm, 0.5=-overgangsgebied, 1=kalkrijk.

De helm vitaliteitsvariabelen zijn uitsluitend als passieve variabele in de diagrammen weergegeven, daar deze als afhankelijke variabele beschouwd moet worden, maar van geheel andere aard is dan de abundanties van de soorten. Bovendien zijn deze variabelen gesplitst in een kwalitatief deel (aanwezigheid van helm in voet, helling en top) en een kwantitatief deel (vitaliteit van de helm). Voor de vitaliteit van de helm op plaatsen waar geen helm aanwezig is, is arbitrair de over het gehele bestand (bij aanwezigheid van helm) gemiddelde helm vitaliteit in voet, helling en top ingevuld.

Multivariate analyse

Naar aanleiding van een eerste gegevensanalyse met 'Detrended Correspondence Analysis' (DCA) (Hill en Gauch, 1980) bleek, dat Principale Componenten Analyse (PCA) of Redundantie-analyse (RDA) naar verwachting de duidelijkst interpreteerbare resultaten op zou leveren (Ter Braak, a). Redundantie-analyse is een vorm van directe gradiënt-analyse, om de relatie tussen de samenstelling van de vegetatie en de omgevingsfactoren vast te stellen. Redundantie-analyse is uitgevoerd om met behulp van voorwaartse selectie een aantal milieuvariabelen te selecteren dat duidelijk gecorreleerd is met de vegetatie-samenstelling. Aan de hand van de resultaten van deze redundantie-analyse is beslist welke niet-manipuleerbare milieuvariabelen gebruikt worden om te corrigeren voor verschillen in klimaat, bodemfactoren en seizoen.

In een tweede redundantie-analyse is vervolgens getoetst of effecten zichtbaar zijn van suppletie, door een Monte-Carlo permutatietoets, geconditioneerd op blokken (secties langs de kust), waarbij tevens gecorrigeerd was voor de effecten van kalk, hellingshoogte en expositie. In de tweede redundantie-analyse werden de lineaire effecten van de niet manipuleerbare significant gecorreleerde milieuvariabelen, bijvoorbeeld kalkrijkdom verwijderd door deze variabelen als covariabelen in het model op te nemen.

Tenslotte is, ter illustratie van de geringe effecten, een Principale Componenten Analyse (PCA) uitgevoerd, waarbij deze correctie ook is uitgevoerd met behulp van zogenaamde covariabelen. Alle analyses zijn uitgevoerd met behulp van het computerprogramma CANOCO (CANOnische CORrelatie) (Ter Braak, 1987b).

3.1.4. Koppeling veldgegevens aan JARKUS/DONAR-bestand

De veldgegevens van de helmvitaliteit en de soortensamenstelling zijn gecorreleerd met de in hoofdstuk 2 bewerkte gegevens uit het JARKUS/DONAR-bestand van de zandaanvoer op de kruin van de zeereep. In eerste instantie zijn de gegevens van 1991-1992 en 1992-1993 van twee opeenvolgende raaien gemiddeld en uitgezet tegen de geschatte helmvitaliteit in het tussenliggende vak van 200 of 250 m. Aangezien de helmvitaliteit matig tot slecht correleerde met de gegevens van de omliggende raaien, zijn de instuifgegevens per kustlokatie berekend door alle JARKUS-raaigegevens te middelen. Ook is een gemiddelde helmvitaliteit berekend en een gemiddeld aantal soorten, zowel totaal als uitgesplitst naar aantallen planten per groep met eenzelfde levenscyclus. Deze gegevens zijn in een tabel geplaatst, naar toenemende gemiddelde zandinstuiving voor referentie- en suppletielokaties.

3.1.5. Voorstellen monitoring toekomstige effecten zandsuppleties

Naar aanleiding van de resultaten van analyse van de veldgegevens is, in overleg met de Dienst Weg- en Waterbouwkunde, een voorstel uitgewerkt om in de toekomst voor en na zandsuppleties de helmvitaliteit en soortensamenstelling te monitoren. Het monitoringprogramma kan door de plaatselijke beheerders worden uitgevoerd.

Soortenlijst met de gebruikte afkortingen

afkorting	latijnse naam	Nederlandse naam
Amm are	Ammophila arenaria	Helm
Anc arv	Anchusa arvensis	Kromhals
Acr pub	Arctium pubens	Middelste klit
Are ser	Arenaria serpyllifolia	Zandmuur
Art cam	Artemisia camp.ssp.mar	Duinaveruit
Atr lit	Atriplex littoralis	Strandmelde
Atr por	Atriplex portulacoides	Gewone zoutmelde
Atr pro	Atriplex prostrata	Spiesmelde
Bet pen	Betula pendula	Ruwe berk
Bry cre	Bryonia cretica	Heggerank
Cak mar	Cakile maritima	Zecraket
Cal epi	Calamagrostis epigejos	Duinriet
Cal bal	Calammophila baltica	Noordse helm
Cal sep	Calystegia sepium	Haagwinde
Cal sol	Calystegia soldanella	Zeewinde
Car hir	Cardamine hirsuta	Kleine veldkers
Car are	Carex arenaria	Zandzegge
Cen lit	Centaureum littorale	Strandduizendguldenkruid
Cer fon	Cerastium fontanum	Gewone en Glanzige hoornbloem
Cer sem	Cerastium semidecandru	Zandhoornbloem
Cha ang	Chamerion angustifolium	Wilgeroosje
Cic int	Cichorium intybus	Wilde cichorei
Cir arv	Cirsium arvense	Akkerdistel
Cir vul	Cirsium vulgare	Speerdistel
Cra mar	Crambe maritima	Zeekeel
Cyn off	Cynoglossum officinale	Veldhondstong
Dau car	Daucus carota	Peen
Dip ful	Dipsacus fullonum	Grote kaardebol
Ely ath	Elymus athericus	Strandkweek
Ely far	Elymus farctus	Biestarwegras
Ely rep	Elymus repens	Kweek
Eri can	Erigeron canadensis	Canadese fijnstraal
Ero cic	Erodium cicutarium	Gewone reigersbek s.l.
Ero glu	Erodium glutinosum	Kleverige reigersbek
Ery mar	Eryngium maritimum	Blauwe zeedistel
Eup par	Euphorbia paralias	Zeewolfsmelk
Fes rub	Festuca rub.ssp.arenaria	Duinzwengkras
Gal mol	Galium mollugo	Glad walstro
Gal ver	Galium verum	Geel walstro
Gla fla	Glaucium flavum	Gele hoornpapaver
Gla mar	Glaux maritima	Melkkruid
Hel ann	Helianthus annuus	Zonnebloem
Her man	Heracleum mantegazzian	Reuzenbereklaauw
Hie umb	Hieracium umbellatum	Schermhavikskruid
Hip rha	Hippophae rhamnoides	Duindoorn
Hon pep	Honckenya peploides	Zeepestelein
Hyp rad	Hypochaeris radicata	Gewoon biggekruid
Jas mon	Jasione montana	Zandblauwtje
Leo aut	Leontodon autumnalis	Vertakte leeuwetand
Leo sax	Leontodon saxatilis	Kleine leeuwetand
Ley are	Leymus arenarius	Zandhaver
Mat mar	Matricaria maritima	Reukeloze kamille
Myo ram	Myosotis ramosissima	Ruw vergeet-mij-nietje
Oen par	Oenothera parv.var.ammophila	Zandteunisbloem
Ono rep	Ononis repens ssp.repens	Kruipend stalkruid
Pet cri	Petroselinum crispum	Tuinpeterselie
Phl are	Phleum arenarium	Zanddoddegras
Phr aus	Phragmites australis	Riet
Pic hie	Picris hieracioides	Echt bitterkruid
Pop alb	Populus alba	Witte abeel
Ros pim	Rosa pimpinellifolia	Duinroosje
Ros rub	Rosa rubiginosa	Egelantier
Rub cae	Rubus caesius	Dauwbraam
Sal pur	Salix purpurea	Bittere wilg
Sal rep	Salix repens	Kruipwilg
Sal kal	Salsola kali	Loogkruid
Sam nig	Sambucus nigra	Gewone vlier
Sed acr	Sedum acre	Muurpeper
Sen jac	Senecio jac.ssp.dunens	Duinkruiskruid
Sen syl	Senecio sylvaticus	Boskruiskruid
Sen vis	Senecio viscosus	Kleverig kruiskruid
Sen vul	Senecio vulgaris	Klein kruiskruid
Sol dul	Solanum dulcamara	Bitterzoet
Sol dul	Solanum triflorum	Driebloemige nachtschade
Son arv	Sonchus arv.var.maritima	Zeeemelkdistel
Ste pal	Stellaria pallida	Duinvogelmuur
Sym off	Symphytum officinale	Gewone smeewortel
Tus far	Tussilago farfara	Klein hoefblad
Urt dio	Urtica dioica	Grote brandnetel
Ver tha	Verbascum thapsus	Koningskaars
Vio cur	Viola curtisii	Duinviooltje

3.2. Literatuurstudie

3.2.1. Helmvitaliteit

De belangrijke abiotische factoren die de vegetatiezonering in de zeewerende duinen bepalen, zijn stuivend zand en zoutspray. Zand wordt vanaf het strand en zout vanuit de brandingszone via de wind naar de duinen gevoerd. De invloed van zanddepositie en zoutspray neemt af in landwaartse richting (Van Dieren, 1934). Plantesoorten die op de buitenzijde van de zeereep voorkomen, zijn meer tolerant voor overstuiving en zoutspray dan plantesoorten die op de landzijde en verder landinwaarts voorkomen (Sykes and Wilson, 1988 en 1990). Zandsuppleties kunnen van invloed zijn op het verstuivingsproces en de aard van het instuivende materiaal, maar de zoutspray zal hierdoor onveranderd blijven. Overige abiotische factoren die bij de totstandkoming van gradiënten in de buitenduinvegetatie betrokken zijn, zullen niet direct door zandsuppleties worden beïnvloed, maar indirecte effecten kunnen optreden (zie hiervoor paragraaf 3.3).

Evenwijdig aan deze gradiënt van zanddepositie en zoutspray vindt een ontwikkeling plaats van ziektenverwekkende micro-organismen in het duinzand. Voor zover bekend, zijn de micro-organismen meer gerelateerd aan de plantengroei dan aan de gradiënt van zanddepositie en zoutspray. Echter, doordat zand en zout de vegetatie mee bepalen, wordt de ontwikkeling van de micro-organismen ten dele, indirect, gestuurd door zanddepositie en zoutspray. De voor de planten schadelijke micro-organismen behoren tot de groepen van de bodemschimmels en de planteparasitaire aaltjes (Van der Goes, 1992a en b).

Helm kan alleen vitaal blijven indien de planten voortdurend worden overstoven met vers zand. Door wortels te vormen in het verse stuifzand ontsnappen de planten letterlijk aan hun pathogenen, die echter steeds weer opnieuw tot ontwikkeling komen in de nieuwe wortellaag (Van der Putten et al., 1989; Van der Goes 1992a en b). De snelheid waarmee de schimmels en aaltjes de helmwortels koloniseren in relatie tot de mate en timing van de jaarlijkse zanddepositie, bepaalt of de helmplanten hun vitaliteit langdurig kunnen behouden. Het feit dat helm reeds in de winter wortels kan vormen in een nieuw aangestoven laag zand vóórdat de schimmels en aaltjes in de bodem actief worden, biedt de helmplanten de mogelijkheid tijdelijk te ontsnappen aan schadelijke bodemorganismen (De Rooij-Van der Goes en Jungerius, 1994).

Het is niet bekend in welke mate de eigenschappen van het overstuivende zand de migratie van de bodempathogenen van de ene wortellaag naar de andere kunnen beïnvloeden. Verstoven suppletiezand kan verschillen van verstoven strandzand (Olij, 1993; Van der Putten en Peters, 1993). Het ligt voor de hand dat de migratiesnelheid en overleving van de bodempathogenen mede worden bepaald door de textuur van het zand en dus door de zuurstof- en vochtvoorziening in het bodemprofiel.

Tot nu toe blijken alle belangrijke zandbindende plantesoorten in de zeereep hun eigen bodemziekten te hebben. Duinzwenkgras en zandzegge, die helm opvolgen als natuurlijke zandbinders, zijn resistent tegen de bodempathogenen van helm (Van der Putten et al., 1993). De groei van helm, duinzwenkgras, zandzegge, strandkweek en duindoorn wordt dus in sterke mate bepaald door interactie van de planten met bodempathogenen (Oremus en Otten, 1981; Zoon et al., 1993; Van der Putten et al., 1993). Voorstudies geven aan, dat de specifieke bodempathogenen uit de wortelzone van helm de concurrentiekracht van helm ten opzichte van duinzwenkgras kunnen verlagen (Verveen, 1992; Wong, 1993). Indien als gevolg van zandsuppletie de verstuiving wordt beperkt, de aanzanding afneemt en daardoor de helmbegroeiing minder vitaal wordt, kan de helmbegroeiing in suppletiegebieden wordt verdrongen door duinzwenkgras en andere opvolgende plantesoorten. Hoever deze vervanging van helm plaats kan vinden, hangt af van de mate van zoutspray, de tolerantie van de opvolgende plantesoorten voor zoutspray en de snelheid waarmee de natuurlijke opvolgers zich in zeewaartse richting kunnen uitbreiden.

Onder natuurlijke omstandigheden neemt in een zich zeewaarts uitbreidende kust de zandaanvoer van de duinvoet tot in de binnenduinen geleidelijk af van veel (60-100 cm per jaar) tot weinig (0-5 cm per zandaanvoer jaar). In Zweeds onderzoek (Wallèn, 1980) nam, nadat de zandaanvoer geleidelijk minder werd, gedurende de eerste 10 jaren de plantdichtheid en de productiviteit van helm langzaam af en het relatieve aandeel van de ondergrondse plantedelen geleidelijk toe (Tabel 4). In het Zweedse onderzoek was echter sprake van een geleidelijke afname van de zandaanvoer, hetgeen ook kenmerkend is voor het proces dat zich afspeelt bij natuurlijke duinvorming. In het geval van zandsuppleties zal de zandinstuiving, indien deze verandert, drastischer kunnen veranderen, met als extremen van veel naar weinig (in het geval van een zandsuppletie waar schelpenvloertjes of sliblagen tot ontwikkeling komen) en van weinig naar veel bij zeer goed stuivend zand (Texel: De Koog; zie paragraaf 3.5). Wat van dergelijke abrupte ontwikkelingen het gevolg is, is nog niet onderzocht. Voor een dergelijk onderzoek is het van belang over gegevens van de vitaliteit vóór en na de uitvoering van zandsuppleties te beschikken.

Tabel 4. Helmkenmerken (vaak verhoudingsgewijs weergegeven) van een jonge (een jaar oude) en een relatief oude (10 jaar oude) begroeiing. De oude begroeiing ontving geen of zeer weinig aanstuivend zand (Wallèn, 1980; onderzoek uit zuid Zweden).

Plantkenmerk	Helm jong		Helm oud
Scheutdichtheid in mei		=	
Scheutdichtheidstoename t.o.v. mei	4 x		2 x
Lengte eerste blad	2	:	1
Maximale drogestof productie (g/m ²)	400		110
Aantal bladeren		>	
Bladbreedte		>	
Rhizoom/wortel	2/1		2/1
Rhizoom + wortelgewicht		=	
Proportioneel ondergrondse plantedelen (%)	50		85
Proportioneel aandeel wortels in totaal (%)	12		27

Witte vlekken in de kennis over helm in relatie tot zandsuppleties betreffen dus:

- de reactie van zeer vitale helm op een sterke reductie van de zandinstuiving die zich in een kort tijdsbestek voltrekt.
- de capaciteit van gedegenerende helm om snel op sterke toename van de zandaanvoer te kunnen reageren en het zand effectief te kunnen vastleggen.
- de effecten van veranderingen in de abiotische eigenschappen van aangestoven suppletiezand (met name de mogelijke veranderde korrelgrootte samenstelling op de vocht- en zuurstofhuishouding in het zand en de gevoeligheid van het zand voor bodemverdichting op de interactie tussen helm en de ziektenverwekkende bodemmicroorganismen).

3.2.2. Soortensamenstelling

De samenstelling van de zeereepvegetatie betreft, met uitzondering van helm, planten die zich van nature hebben kunnen vestigen. De levensstadia die een plant doorloopt, zijn:

kieming ⇒ vestiging ⇒ vegetatieve groei ⇒ bloei ⇒ zaadzetting ⇒ zaadvorming ⇒ dispersie.

In duinen zijn voor de kieming en vestiging van planten uit zaad nutriënten, vocht, zandinstuiving, zoutspray en predatie door zoogdieren of insecten, voor zover bekend, de belangrijkste beperkende milieufactoren (Maun, 1994). Op grond van correlaties met gradiënten in het abiotisch milieu wordt vaak verondersteld dat de verspreiding van volwassen planten samenhangt met abiotische milieufactoren zoals zoutspray en zanddepositie. Bij experimentele toetsing van planten op tolerantie voor zanddepositie en zoutspray bleek echter dat lang niet alle planten die dicht bij de zee voorkomen ook goed tegen zandinstuiving kunnen en *vice versa* (Sykes en Wilson, 1988, 1989 en 1990). Biestarwegras komt meer zeewaarts voor, maar kan minder goed tegen zandoverstuiving dan bijvoorbeeld helm. Een andere verklaring is, dat planten elkaar direct of indirect kunnen beïnvloeden. Het is hierdoor mogelijk dat sommige plantesoorten dichter bij de zee kunnen voorkomen dan op grond van bijvoorbeeld hun tolerantie voor zoutspray voorspeld zou worden. In de beschutting van zoutspray-tolerante planten, zoals helm, kunnen zoutspray-intolerante planten overleven, als het instuifpatroon geen beperkende factor vormt (Boyd, 1992). Anderzijds kunnen planten in de beschutting van helm gedurende droogte afsterven indien helm beter om het beschikbare vocht kan concurreren (Barbour et al., 1976; Barbour et al., 1985; Boyd, 1992; Payne, 1980). In hoeverre verschillende gevoeligheden voor boven- en ondergrondse ziekten, dan wel voor begrazing door zoogdieren of insecten een rol meespelen bij de verspreiding van planten in buitenduinen, is nauwelijks onderzocht.

Hoeveel of hoe weinig soorten in de zeereep kunnen voorkomen, hangt dus af van een combinatie van abiotische milieufactoren (zoutspray, vocht aanbod tijdens kieming en vestiging, etc.), van biotische factoren (wel/niet voorkomen van beschuttende of concurrerende planten, hebivorie, pathogenen etc.) en van de tijd na verandering in de milieuomstandigheden, omdat planten een gebied moeten kunnen bereiken. De soortenrijkdom in de zeereep zou dus een afspiegeling kunnen zijn van de milieudynamiek, maar ook andere omstandigheden, zoals zaadverspreiding, kiem- en vestigingsomstandigheden, kunnen een rol meespelen bij de totstandkoming van de soortsdiversiteit.

In het algemeen is zeereepvegetatie soortenarm, maar onder bepaalde omstandigheden, waarschijnlijk indien de dynamiek gedurende langere tijd relatief gering is, kan het aantal soorten toenemen. Naarmate de zandinstuiving toeneemt, kan verwacht worden dat het aantal soorten afneemt en als de zandaanvoer gereduceerd wordt, kan het aantal soorten toenemen. Een grote soortenrijkdom is beslist geen goed criterium voor de waardering van zeereepvegetatie; belangrijk is het om na te gaan of voor soorten die gebonden zijn aan het zeereepmilieu voldoende kansen bestaan. Aan deze vraag is voor de Nederlandse situatie nog maar nauwelijks onderzoek verricht.

Indien het effect van zandsuppleties op zeereepsoorten getoetst wordt, kan voor elk levensstadium worden nagegaan hoe de planten mogelijk kunnen worden beïnvloed door de afwezigheid van regelmatige zandaanvoer of juist door overmatige zandaanvoer. Hierbij dient rekening te worden gehouden met de levensgeschiedenis van de planten. Als basis voor het opstellen van hypothesen over de vegetatie-ontwikkeling in relatie tot zandsuppletie is uitgegaan van de soortenlijst die op grond van de veldinventarisatie van de zeereep is opgesteld. De indeling op grond van soortskarakteristieken van de plantesoorten die in de zeereep voorkomen is uitgevoerd aan de hand van floristische en oecologische kenmerken. Hierbij is gebruik gemaakt van het Botanisch Basisregister (CBS, 1993). Op grond van dat overzicht zijn de plantesoorten die in de zeereep voorkomen in eerste instantie gegroepeerd op grond van levensstrategie (Tabel 5) omdat een kortstondige of plotselinge verandering van zandaanstuiving een ander effect zal hebben op een 1-jarige soort zoals zeeraket dan op een overblijvende soort als biestarwegras.

Er is onderscheid gemaakt in:

- 1-jarige zomerannuëlen. Dit zijn soorten die in de regel maar één generatie per jaar hebben. Zij kiemen in het voorjaar, bloeien in de zomer en overwinteren als zaad.
- 1-jarige zomer- en winterannuëlen. Winterannuëlen zijn soorten die kiemen in de

nazomer of herfst, brengen de winter door als bladrozet en bloeien in het voorjaar en overzomeren als zaad.

- 2- en meerjarigen. Deze soorten overwinteren in het eerste levensjaar als zaad, kiemen in het voorjaar of de voorzomer, overwinteren jaar als rozet (soms alleen wortelknoppen) en bloeien in de zomer van het 2^e jaar. Van sommige soorten is bekend dat ze de bloei kunnen uitstellen en zo wel 7 jaar oud kunnen worden.
- overblijvende planten. Dit zijn planten waarvan in de winter in de bovengrondse delen afsterven en die meermalen bloeien in hun leven.
- houtige planten. Dit zijn planten met een houtige stengel of stam, die meermalen bloeien in hun leven.

Vervolgens zijn de groepen gesplitst in een aantal subgroepen (Tabel 5):

- de klim/sluiersplanten
- de grasachtigen (met lange uitlopers, met korte uitlopers en zonder uitlopers)
- de kruiden (de liggende kruiden, de wortelrozetplanten, de rozetstengelplanten en stengelbladplanten) en
- de struiken.

3.3. Opstelling van hypothesen voor ontwikkeling van helmvitaliteit en soortensamenstelling

Er worden vier scenario's gehanteerd voor mogelijke ontwikkelingen in de aanzanding:

- de aanzanding in de zeereepbegroeiing stagneert (0-5 cm/jaar)
- de aanzanding is normaal, maar gering (5-20 cm/jaar)
- de aanzanding is normaal, maar aanzienlijk (20-100 cm/jaar)
- de aanzanding is extreem (> 100 cm/jaar).

Deze ontwikkelingen kunnen het gevolg zijn van zandsuppletie, maar ze zijn niet specifiek voor zandsuppletie. Als door kusterosie het strand smaller en lager wordt, kan de aanzanding eveneens afnemen. Evenzo kan door strandaanwas de aanzanding sterk toenemen.

Op grond van veldwaarnemingen en literatuurgegevens kunnen de volgende verwachtingen worden opgesteld voor de ontwikkeling van de helmvitaliteit, begeleidende plantesoorten (ingedeeld naar verschillende functionele groepen en levensvormen en voor de abiotische ontwikkelingen op de zeewaartse helling van zeewerende duinen (Tabel 6.).

Tabel 5. Indeling in levensstrategie en groeivorm van plantensoorten die in de zeereep voorkomen op grond van het Botanisch Basisregister (CBS, 1993). Met - wordt bedoeld dat de gegevens niet bekend zijn.

Levensstrategie en groeivorm	soort	Kiemtijdstip
1-Jarige zomerannuëlen		
Grassen zonder uitlopers	Zandoddegras (Phl are)	lte zomer, vr hrfst
Stengelbladplanten	Kleverig kruiskruid (Sen vis) Spiesmelde (Atr pro) Zeeraket (Cak mar) Strandmelde (Atr lit) Loogkruid (Sal kal) Kromhals (Anc arv) Reukeloze kamille (Mat mar) Duinvogelmuur (Ste pal)	voorjr voorjr voorjr voorjr, zomer vr zomer voorjr, hrfst voorjt, hrfst -
Zomer en winterannuëlen		
Rozetstengelbladplanten	Kleine veldkers (Car hir) Ruw vergeet-mij-nietje (Myo ram) Kleverige reigersbek (Ero glu) Gewone reigersbek (Ero cic)	direct voorjr lte voorjr, vr zomer zomer, hrfst
Stengelbladplanten	Zandmuur (Are ser) Klein kruiskruid (Sen vul) Canadese fijnstraal (Eri can) Zandhoornbloem (Cer sem)	direct voorjr, lte hrfst voorjr, zomer zomer
2- en meerjarigen		
Rozetstengelbladplanten	Koningskaars (Ver tha) Duinkruiskruid (Sen jac) Echt bitterkruid (Pic hie) Zandteunisbloem (Oen par)	- lte zomer, hrfst lte voorjr -
Stengelbladplanten	Veldhondstong (Cyn off) Speerdistel (Cir vul) Gele hoornpapaver (Gla fla) Zandblauwtje (Jas mon) Strand duizendguldenkruid (Cen lit)	voorjr voorjr, hrfst voorjr direct lte voorjr
Houtige planten		
Struiken	Kruipwilg (Sal rep) Duindoorn (Hip rha) Duinroosje (Ros pim) Gewone vlier (Sam nig) Dauwbraam (Rub cae) Kruipend stalkruid (Ono rep)	direct voorjr voorjr voorjr vr voorjr, hrfst voorjr, hrfst
Overblijvende planten		
Klim- en sluijerplanten	Heggerank (Bry cre) Glad walstro (Gal mol) Bitterzoet (Sol dul)	lte voorjr voorjr, hrfst lte voorjr
Grassen met lange uitlopers	Duinriet (Cal epi) Strandkweek (Ely ath) Helm (Amm are) Zandhaver (Ley are) Biestarwegras (Ely far) Zandzegge (Car are) Noordse helm (Cal bal)	direct direct voorjr voorjr lte voorjr lte voorjr -
Grassen met korte uitlopers	Duinzwengkras (Fes rub)	-
Liggende kruiden	Driebloemige nachtschade (Sol tri) Zeewinde (Cal sol) Zeepostelein (Hon pep)	voorjr voorjr? lte voorjr, vr zomer
Wortelrozetplanten	Kleine leeuwetand (Leo sax) Klein hoefblad (Tus far) Vertakte leeuwetand (Leo aut) Gewoon biggekruid (Hyp rad)	lte voorjr zomer zomer, hrfst zomer
Rozetstengelbladplanten	Schermhavikskruid (Hie umb) Akkerdistel (Cir arv)	voorjr lte voorjr
Stengelbladplanten	Muurpeper (Sed acr) Gewone hoornbloem (Cer fon) Zeekool (Cra mar) Zeewolfamelk (Eup par) Duinaveruit (Atr cam) Blauwe zeedistel (Ery mar) Melkkruid (Gla mar) Geel walstro (Gal ver) Duinviooltje (Vio cur) Zeemelkdistel (Son arv) Gewone zoutmelde (Atr por)	direct, voorjr voorjr voorjr voorjr lte voorjr lte voorjr, vr zomer zomer hrfst - - voorjr

Tabel 6. Verwachting van de ontwikkeling van de vegetatie (helmvitaliteit en aantal soorten) en van abiotische factoren als gevolg van vier mogelijke aanzandingsscenario's.

		Zandaanvoer			
		0-5 cm (Geen)	5-20 cm (Normaal)	20-80 cm (Normaal)	> 100 cm (Extreem)
<i>Ontwikkeling vegetatie</i>					
Helmvitaliteit		-	+	++	-
Totaal aantal plantesoorten		++	+	-	--
Aantal eenjarigen		++	-	--	--
Aantal 2-meerjarigen		++	+	--	--
Aantal overblijvenden	Grassen	++	++	+	--
	Stengelrozetten	++	+	-	--
	Rozetplanten	++	-	--	--
	Struiken	+	+	+	-
Aantal specifieke zereepsoorten		-	++	+(+)	-
<i>Ontwikkeling abiotische factoren</i>					
Open plekken		+	-	+/-	++
Organisch stofgehalte top laag		+	-/+	-	-
Hydrofobie		+	+/-	-	-
Vochtbeschikbaarheid	winter	+/-	+	++	++
	zomer	--	-	+/-	+/-
Nutriëntenaanvoer		-	+/-	+	+
Kans op erosie		+	-	++	+(+)

In algemene termen wordt verwacht dat in het geval de zandaanvoer sterk gereduceerd is, de helmvitaliteit zal afnemen, waarna door helmdegeneratie open plekken ontstaan en het aantal plantesoorten zal toenemen. De meeste planten kiemen in het voorjaar (Tabel 5). Eenjarige planten zijn voor overleving afhankelijk van regelmatige (jaarlijkse) doorloping van de gehele levensgeschiedenis. Planten die in het najaar hun zaden laten vallen, zijn uiterst kwetsbaar voor overstuiving, omdat ze dan in het voorjaar te ver ondergestoven zijn om nog te kunnen kiemen. Alleen planten die een aanpassing hebben waardoor ze geleidelijk hun zaden laten vallen, zoals zeeraket (Maun et al., 1990) of loogkruid kunnen als eenjarige flexibel reageren op overstuiving gedurende de winterperiode, omdat ze tot in het voorjaar zaden aan de moederplant (dus boven het zandoppervlak) kunnen vasthouden. Daarom wordt verwacht dat stagnerende zandaanvoer met name tot een toename in het aantal eenjarige planten zou leiden, die niet direct karakteristiek zijn voor het dynamische zereepmilieu. Ook de tweejarige rozetplanten zouden door stagnerende zandaanvoer sterk bevoordeeld kunnen worden, omdat ze tenminste een winterseizoen moeten overleven willen ze in het volgende jaar zaad kunnen vormen. De rozetten zijn niet goed bestand tegen overstuiving. Stagnatie van de zandaanvoer zal leiden tot een accumulatie van organische stof in de bovenste zandlagen. Hierdoor neemt de waterafstotendheid van het zand, vooral in de zomer, toe (Dekker & Jungerius 1990). Naarmate meer zand instuift, zal het aantal plantesoorten afnemen. De planten die het langst overblijven, zijn clonaal groeiende soorten, omdat die relatief

goed tegen overstuiving bestand zijn. Clonale planten kunnen door vegetatieve groei met het zandoppervlak mee omhoog groeien. Helm is van alle clonale groeiers het best in staat grote hoeveelheden aangevoerd zand te overleven. In het geval grote zandinstuiving plaatsvindt vertoont de helmbegroeiing een polvormige structuur met tussen de pollen grote open plekken. Biestarwegras, zandhaver, noordse helm en duinzwenkgras zijn minder goed in staat grote hoeveelheden zandinstuiving te overleven. Samen met het zand worden ook nutriënten aangevoerd, zoals kalk, fosfor en kalium (Van Dieren 1934). Naarmate de helmbegroeiing meer open plekken vertoont, zal de kans op erosie ook toenemen.

In de volgende paragrafen zullen deze verwachtingen ten aanzien van ontwikkelingen na zandsuppleties worden getoetst.

3.4. Resultaten veldwerk

In deze paragraaf wordt allereerst (in 3.4.1 en 3.4.2) beschreven hoe de dataset is gecorrigeerd voor variantie die door milieuvariabelen wordt verklaard welke niets met zandsuppletie te maken hebben. Vervolgens wordt in 3.4.3 aangegeven wat de effecten van zandsuppleties zijn op de soortensamenstelling en in 3.4.4 wat de effecten zijn op de helmvitaliteit.

3.4.1. Analyse van variantie die niet door zandsuppleties wordt verklaard m.b.v. redundantie-analyse

In een eerste redundantie-analyse (RDA) is nagegaan welke milieuvariabelen, onafhankelijk van zandsuppletie, een zodanig deel van de variantie in de vegetatiegegevens verklaren dat correctie hiervoor noodzakelijk is. Het resultaat van de analyse is een reductie van de vele dimensies in de gegevens tot vier dimensies (assen). Deze zogenaamde canonische assen geven het verband (de correlatie) tussen de milieuvariabelen en de vegetatiekenmerken zo goed mogelijk weer. De eerste vier assen verklaren achtereenvolgens 17,9 tot 4,4% van de variantie in de soortgegevens (zie Eigenwaarden in Tabel 7). De Monte-Carlo permutatietoets gaf aan dat nog meer variabelen een significante bijdrage leverden aan de verklaring van de variantie in de soortgegevens. Echter, door elk van de volgende variabelen wordt minder dan 1,5% van de variantie verklaard, hetgeen erop neerkomt dat het hier waarschijnlijk random variatie in een of enkele soorten betreft: de verklaarde variantie bij de volgende variabelen is lager dan de verwachte variantie op een as bij een random vegetatietabel met 76 soorten en wordt daarom niet relevant geacht. Op grond van het geringe percentage verklaarde variantie vanaf as 3 is besloten alleen de eerste twee assen te interpreteren. Een volledige uitvoer van CANOCO kan op verzoek bij de auteurs worden opgevraagd.

Tabel 7. Overzicht van de resultaten van de eerste redundantie-analyse. De Eigenwaarden (*100%) leveren het percentage variantie dat door de assen 1 tot en met 4 wordt verklaard op grond van de soortensamenstelling gegevens. Daarnaast zijn eveneens correlaties bepaald tussen de soortensamenstelling en de milieuvariabelen die niets met zandsuppletie te maken hebben.

Assen	1	2	3	4	Totale variantie
Eigenwaarden	.179	.098	.054	.044	1.000
Soortsomgevingscorrelaties	.881	.798	.820	.750	
Cumulatieve percentages variantie					
van de soortgegevens	17.9	27.7	33.1	37.5	
van de soortsomgevingscorrelatie	41.8	64.7	77.3	87.6	
Som van alle 'unconstrained' eigenwaarden					1.000
Som van alle canonische eigenwaarden					.428

In Tabel 8 is van een aantal variabelen getoond welk deel van de variantie in vegetatiekenmerken ze verklaren. De eerste verklarende variabele is het kalkgehalte, dat 13% van de variantie verklaart. Voor de volgende variabelen is steeds vermeld welk percentage van de variantie additioneel wordt verklaard. Dat wil zeggen dat elke toevoeging op zich een groter deel van de variantie verklaart, maar dat het merendeel van deze variantie reeds is verklaard door variabelen die eerder in het model zijn opgenomen: de verklarende variabelen zijn in grote mate onderling gecorreleerd. Zo kan hellingslengte bijvoorbeeld een duidelijke gebiedskarakteristiek zijn want op sommige kustlokaties is de zeereep duidelijk hoger dan op andere en alle Waddeneilanden zijn relatief kalkarm. Enkele andere verklarende variabelen zijn de hellingslengte (3%) en de expositie (de som zuid en de som noord verklaren ieder 2 % van de variantie). Verder is duidelijk dat ook een belangrijk deel van de variantie wordt verklaard door de ligging van kustvakken: Noord-Holland verklaart 8% en Ameland en Walcheren ieder 5% van de variantie in vegetatiekenmerken. De laatste twee variabelen (som noordwest en Schouwen) zijn toegevoegd zonder toetsing, daar de significantieniveaus alle dermate hoog waren dat dit, gezien de verklaarde variantie, onrealistisch leek. Deze significante resultaten zijn mogelijk het gevolg van ruimtelijke autocorrelatie: de bemonstering was niet random, waardoor plaatselijk toevallige aanwezigheid van soorten een grote rol kan spelen in vegetatieopnamen die vlak bij elkaar liggen. In dit verband wordt ook wel de term pseudo-replicatie gebruikt. In Tabel 8 zijn tenslotte enige variabelen opgenomen die na correctie voor de voorgaande variabelen geen variantie meer verklaarden. Bij deze variabelen (vanaf Wadden) is geen cumulatief percentage verklaarde variantie vermeld, daar dit niet meer toeneemt: Het is mogelijk de waarde van deze variabelen te berekenen uit de waarde van de geselecteerde variabelen. Het kalkarme district (de Wadden) is bijvoorbeeld het complement van het kalkrijke en het intermediaire district. Om het overzicht van verklarende variabelen compleet te maken zijn van de Wadden, Zeeland en Goeree eveneens de gemiddelden en standaarddeviaties opgenomen in Tabel 8.

De door alle variabelen verklaarde variantie (63%) is de waarde, zoals berekend door CANOCO. Deze waarde is te hoog, daar in de lijst van 'onafhankelijke' variabelen ook enkele 'afhankelijke' variabelen (responsvariabelen) zijn opgenomen, namelijk de variabelen betreffende aanwezigheid en vitaliteit van helm in duinvoet, helling en top.

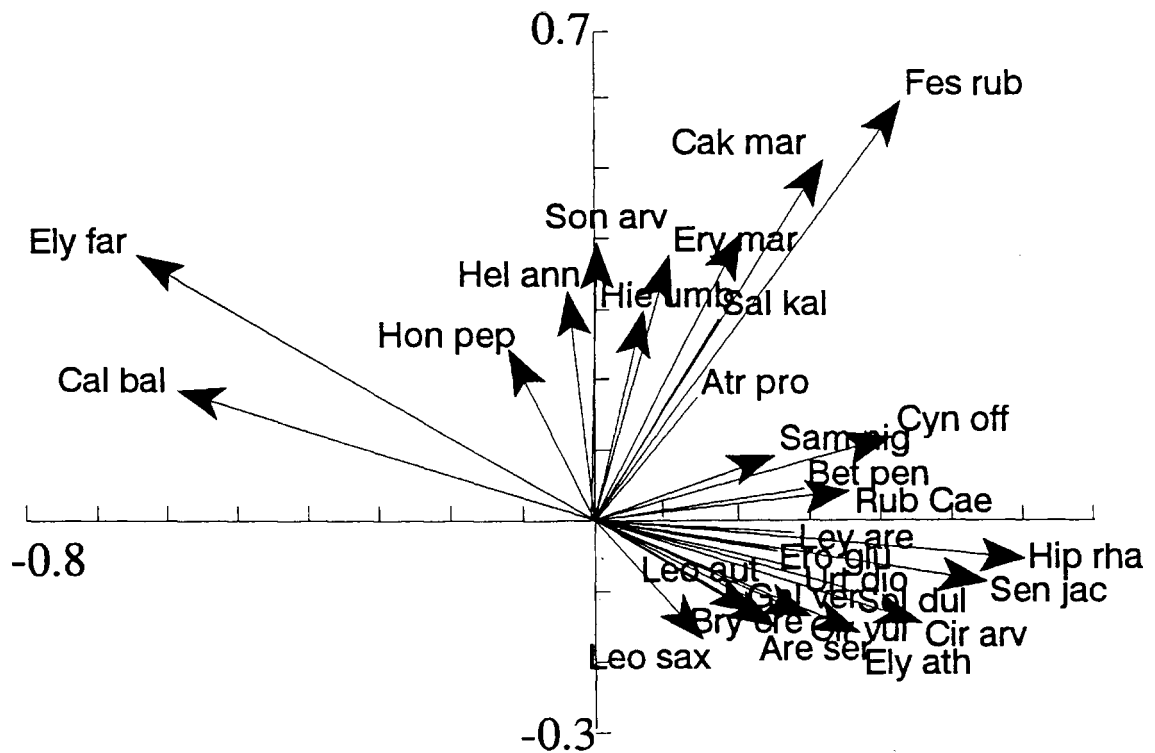
Tabel 8. Door 'voorwaartse selectie' geselecteerde milieuvariabelen, gemiddelden en standaarddeviaties per variabele (bijvoorbeeld: de dummyvariabelen voor het kalkgehalte leveren een gemiddelde van 0,56, waaruit blijkt dat meer dan de helft van alle opnamen in het kalkrijke en minder dan de helft in het kalkarme district en intermediaire district zijn gemaakt, Noord-Holland levert 21 procent van de opnames en de gemiddelde hellingslengte is 15,3 m), het percentage door de betreffende milieuvariabelen verklaarde variantie en de F-ratio.

Nummer	Variabele	Gemiddelde	S.D.	Cumulatief % variantie	F-ratio
8	Kalkgehalte	.5606	.4684	13	
16	Noord-Holland	.2108	.4078	21	21.87
22	Ameland	.1928	.3945	26	15.61
25	Walcheren	.1883	.3910	31	14.98
6	Hellingslengte	15.3	6.7237	34	8.76
17	Noord-Holland3	.1076	.3099	37	9.30
33	Som Zuid (WZW t/m OZO)	.3587	.9066	39	7.73
30	SNW	3.0493	1.3990	41	
26	Schouwen	.1749	.3837	43	
20	Wadden	.3857	.4867		
24	Zeeland	.4036	.4906		
27	Goeree	.0359	.1860		
Alle variabelen				63	

Figuur 14 geeft de correlaties weer van de soorten met de assen voordat de dataset is gecorrigeerd voor milieuvariabelen (bijvoorbeeld kalkgehalte en geografische locatie) die niets met zandsuppletie te maken hebben. De schaaldelen van de assen zijn 0,1. De lengte van de pijl geeft de correlatie met het afbeeldingsvlak weer. Deze kan worden berekend met behulp van de driehoekstelling $A^2 + B^2 = C^2$. De correlatie voor *Festuca rubra* is dus de wortel uit $(0,6^2 +$

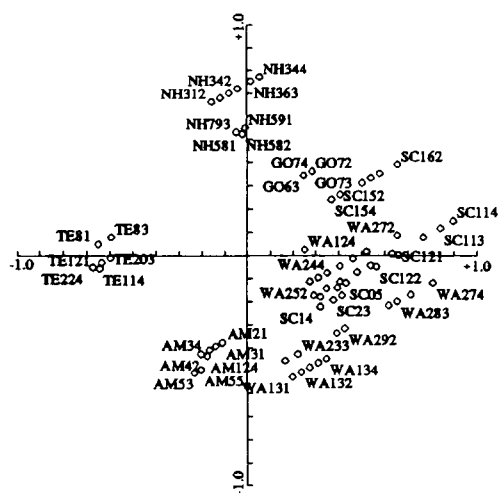
$0,4^2 = 0,72$. Soorten die weinig variatie vertonen en/of weinig gecorreleerd zijn met de geselecteerde milieuvariabelen, zijn slecht gecorreleerd met de assen en komen in het centrum van het diagram terecht. Deze soorten zijn niet in Figuur 14 afgebeeld.

De soorten, waarvan de abundantieverschillen het meest gerelateerd zijn aan de geselecteerde milieuvariabelen zijn: *Elymus farctus* (biestarwegras), *Calamophila baltica* (noordse helm) (links boven), *Festuca rubra* (duinzwenkgras), *Cakile maritima* (zeeraket) (rechts boven), *Hippophaë rhamnoides* (duindoorn), *Senecio jacobea* (duinkruiskruid) en *Cirsium arvense* (akkerdistel) (rechts onder). De Figuren 15 en 16 zijn projecties van de vegetatie-opnamen in hetzelfde vlak als het soortendiagram in Figuur 14. De richting waarin de pijl van elke soort in Figuur 3.1 wijst, kan in de Figuren 15 en 16 worden gebruikt om na te gaan in welk van de opnamegebieden deze soort het meest in de vegetatie-opnamen voorkwam.

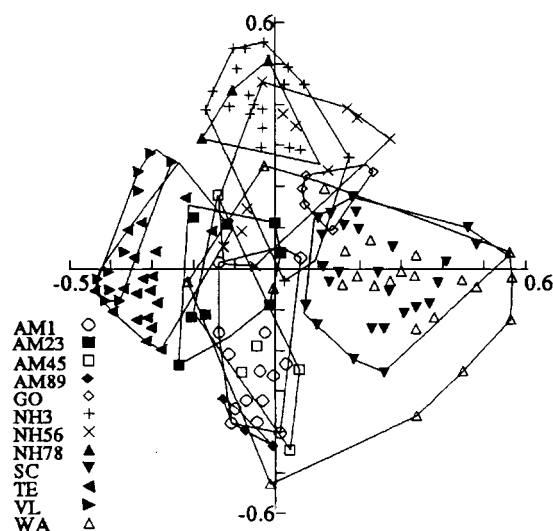


Figuur 14. Redundantie-analyse, correlaties van de soorten met as1 (ordinaat) en as 2 (abscissa). (Voor gebruikte afkortingen zie soortenlijst).

Zowel uit de gebruikte milieuvariabelen (kalkgehalte, expositie, hellingslengte, etc.) als uit de soorten-abundanties kan de score voor de verschillende vegetatieopnamen op de assen berekend worden. Deze twee sets van scores voor de vegetatieopnamen zijn analoog aan respectievelijk de 'verwachte waarde' en de 'gevonden waarde' in een regressieanalyse. Het verschil tussen beide sets van scores heeft te maken met de residuele, niet door het model verklaarde, variantie. Elk van de opnamegebieden verschijnt daardoor als een apart cluster in Figuur 15, waarin de scores op basis van de milieuvariabelen zijn uitgezet. Vlieland is niet afgebeeld, maar overlapt in het assenstelsel met Texel omdat het nagenoeg dezelfde milieuvariabelen heeft. Figuur 16 geeft de scores van de opnamen berekend uit de mate van voorkomen (abundanties) van de verschillende plantesoorten. In vergelijking met Figuur 15 is er meer de variatie tussen de verschillende punten per opnamelokatie (omgeven door een lijn). Dit ligt voor de hand als we de eerder genoemde analogie met een regressielijn gebruiken. Ook hier is te zien dat Vlieland in grote mate overlapt met Texel. Tevens blijkt uit Figuur 16 dat veel van de opnamegebieden (bijvoorbeeld Texel, Ameland, Goeree, etc.) karakteristieke vegetatiekenmerken hebben. De verschillen tussen Figuur 15 en Figuur 16 worden enerzijds verklaard door willekeurige variatie, anderzijds door kleinschalige verschillen in de milieuvariabelen per opnamelokatie, die niet tot uiting komen in de gehanteerde meetschaal (kalkgehalte kan bijvoorbeeld slechts 3 waarden aannemen, expositie is samengevat in brede klassen, etc.)



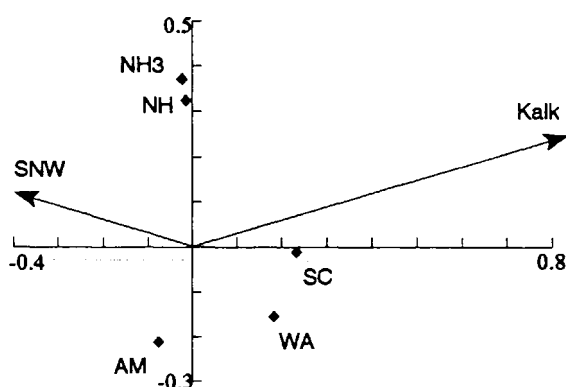
Figuur 15. RDA, scores van de vegetatieopnamen op basis van de milieuvariabelen. As 1 (ordinaat) tegen as 2 (abscissa). (NH=Noord-Holland, WA=Walcheren, TE=Texel, GO=Goeree, AM=Ameland, VL=Vlieland en SC=Schouwen, de cijfers geven een bepaald raaiwak weer.)



Figuur 16. RDA, scores van de vegetatieopnamen op basis van de soortenabundanties. As 1 (ordinaat), tegen as 2 (abscissa). Voor de gebruikte afkortingen zie figuur 15.

Uit vergelijking van de Figuren 14 en 16 blijkt dat de mate van voorkomen van genoemde soorten vooral samenhangt met de geografische lokatie: *Elymus farctus* en *Calammophila baltica* zijn maximaal abundant op Texel en in Noord-Holland benoorden Bergen. *Festuca rubra* en *Cakile maritima*, evenals in mindere mate de soorten waarvan de pijlen in dezelfde richting wijzen, komen maximaal voor in Noord-Holland en delen van de Zeeuwse eilanden. *Hippophae rhamnoides*, *Senecio jacobea* en *Cirsium arvense*, evenals in mindere mate de overige soorten rechts onder in het soorten diagram zijn maximaal aanwezig in Zeeland, met name op Walcheren.

Vaak zijn lokale extremen in abundantie de belangrijkste oorzaak voor deze correlaties. *Elymus farctus* (biestarwegras) komt bijvoorbeeld op Texel veel voor op de Hors en bij paal 12 is de zeereep er lokaal sterk mee bedekt. Op Walcheren komt een hoge duintop voor, waar al wat secundaire koloniseerders als *Hippophaë rhamnoides* (duindoorn) en *Senecio jacobea* (duinkruiskruid) voorkomen, waarschijnlijk doordat op de hoge top de invloed van zoutspray relatief gering is.



Figuur 17. RDA, biplotscores van de kwantitatieve omgevingsvariabelen en centroiden van dummy (0/1) variabelen. Centroiden zijn de gemiddelde scores van de vegetatie-opnamen waarvoor de dummy variabele de waarde 1 heeft, bijv. SC geeft het gemiddelde weer van de opnamen op Schouwen. Voor de gebruikte afkortingen zie figuur 15. (SNW= Som Noord-West zie tekst).

Uit het diagram van de milieuvariabelen (Figuur 17) wordt duidelijk dat de vegetatie-opnamen in Figuur 15 met name zijn gerangschikt op grond van kalkrijkdom (kalkrijk rechts van de verticale as, kalkarm links). Verder speelt de som van de noord-westelijke expositie een rol, evenals andere verschillen tussen lokaties. De hier in de Figuren 14 tot en met 17 afgebeelde variatie langs de Nederlandse kust is bekend en zou, bij verdere interpretatie van de gegevens, de analyse van de gevolgen van zandsuppleties kunnen verstoren.

Conclusie: Een groot deel van de variantie in de samenstelling van de zeereepvegetatie wordt veroorzaakt door verschillen in milieufactoren zoals het kalkgehalte, de expositie en de lengte van de zeewaartse helling en door lokale verschillen die zich vaak per kustvak uiten. Voor verdere analyse van de gegevens zal voor deze variantie gecorrigeerd worden.

3.4.2. De invloed van zandsuppletie op de vegetatie: Redundantie-analyse met correctie voor niet-manipuleerbare milieuvariabelen

Omdat een groot deel van de variantie in de soortensamenstelling verklaard wordt door factoren die niets met zandsuppletie te maken hebben, is in een tweede redundantie-analyse allereerst gecorrigeerd door de milieuvariabelen, die een relatief groot deel van de variantie verklaarden (bijvoorbeeld kalkgehalte), als covariabelen in de berekening mee te nemen. De essentie van deze correctie is dat de gemiddelden voor een aantal (groepen van) gebieden naar het centrum verschoven worden. Voor de continue variabelen die als covariabele opgenomen worden geldt iets soortgelijks: alle variatie gerelateerd aan deze variabelen wordt voorafgaand aan de analyse verwijderd. In deze tweede redundantie-analyse is gecorrigeerd voor milieuvariabelen die volgens Tabel 8 bijdragen aan de variantie van de soortensamenstelling, maar niets met zandsuppletie te maken hebben. Hiertoe zijn bijvoorbeeld kalkgehalte en hellingslengte als covariabelen in de

analyse opgenomen.

Een resultaat van de analyse, die hier verder niet wordt gepresenteerd, was een significante relatie ($P < 0,01$) tussen zandsuppletie en vegetatiesamenstelling. Een dergelijke relatie kan echter ook tot stand komen doordat er ongewild een relatie is tussen zandsuppletie en andere milieuvariabelen.

Om dit te controleren, zijn correlaties berekend tussen suppletievariabelen en milieuvariabelen waarvoor nog geen correctie heeft plaatsgevonden (Tabel 9). Het blijkt, dat er nog steeds hoge correlaties bestaan. Zo zijn bijvoorbeeld gebieden met een zuidwestelijke expositie (SZW) relatief veel als één en drie jaar oude suppleties aanwezig, terwijl twee jaar oude suppleties met een dergelijke expositie minder vaak voorkomen. Bij verdergaande correctie neemt het risico op overcorrectie toe: als er verschillen zijn in suppletie tussen de gebieden, kan het effect van suppletie weggecorrigeerd worden door het opnemen van extra gebiedsvariabelen als covariabele. In extreme gevallen is het zelfs mogelijk dat het suppletieeffect schijnbaar tegengesteld wordt. Daarom is besloten de correctie op dit niveau te stoppen. De vraag blijft echter of verschillen samenhangen met verschillen in milieu tussen gebieden of veroorzaakt worden door zandsuppletie. Het feit dat Texel en Vlieland steeds gespiegelde correlaties vertonen, komt doordat hun gezamenlijke gemiddelde als gevolg van de correcties verschoven is naar het centrum. Het gemiddelde van Texel komt daardoor diametraal tegenover het gemiddelde van Vlieland te liggen.

Tabel 9. Correlaties tussen suppletievariabelen en enkele milieuvariabelen waarvoor geen correctie heeft plaatsgevonden.

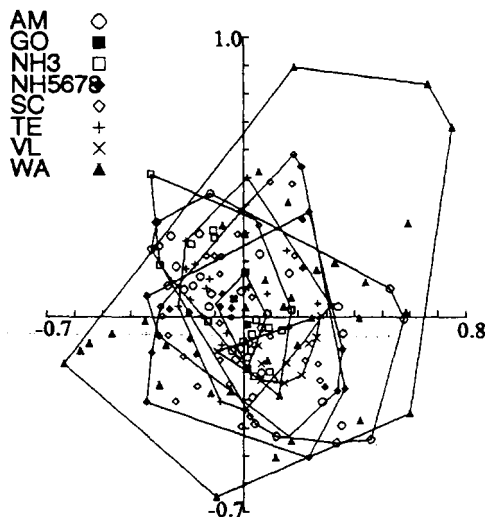
milieu variabelen	tijd na suppletie	aantal suppleties	geen suppletie	1 jr na suppletie	2 jr na suppletie	3 jr na suppletie
TE	-.4167	.3241	-.4658	.4143	.0496	.3136
VL	.4167	-.3241	.4658	-.4143	-.0496	-.3136
SNO	-.1527	.0368	-.0920	-.2359	.1109	-.1425
Snoord	-.0517	-.0239	.0671	-.3733	.1928	-.4334
Swest	.1914	-.0543	.0944	.1923	-.2695	.3526
SZW	.0080	.0655	-.0955	.4329	-.0893	.3316

Conclusie: Een aantal suppletievariabelen is kustvak-afhankelijk. In het opnamebestand hadden bijvoorbeeld 1- en 3 jaar oude suppleties een andere expositie dan de 2 jaar oude suppleties. Er is besloten niet verder voor deze afhankelijkheid te corrigeren. Effecten van zandsuppletie zoals die afgeleid zouden kunnen worden uit verschillen in vegetatie tussen niet-gesuppleerde en gesuppleerde kustvakken zijn mogelijk veroorzaakt door andere milieu-omstandigheden.

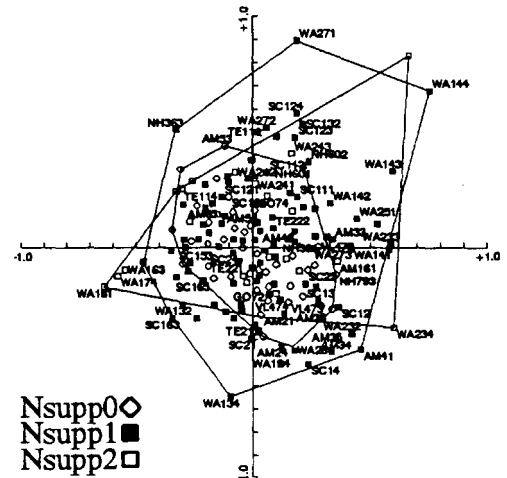
3.4.3 Vergelijking tussen natuurlijke variatie en invloed van zandsuppleties

In de tweede analyse is gecorrigeerd voor de effecten van 'natuurlijke' milieuvariabelen. Aangezien 43% van de variantie in soortensamenstelling reeds verklaard is door deze omgevingsfactoren (kalkgehalte, expositie, enz.; zie Tabel 8), resteert 57% van de variantie waarvan een deel verklaard zou kunnen worden door de effecten van zandsuppleties. Het blijkt, dat van de resterende variantie 4% door suppletievariabelen wordt verklaard, hetgeen ca. 2,3% van de totale variantie is ($0,57 \times 0,04 \times 100$). Daarbij komt dat de correlaties tussen de suppletievariabelen en de overblijvende milieuvariabelen hoog zijn, zoals in Tabel 9 wordt aangetoond. Andere factoren zijn vermoedelijk mede verantwoordelijk zijn voor de verschillen tussen suppletie- en niet-suppletiegebieden. Het percentage variantie, dat door zandsuppleties wordt verklaard, is dus waarschijnlijk lager dan 2,3%.

Tenslotte is een Principale Componenten-Analyse uitgevoerd, waarbij dezelfde set coveriabelen is gebruikt als bij de tweede redundantie-analyse (Figuur 18 tot en met 20). Deze analyse levert geen enkel bewijs op voor mogelijke verbanden tussen zandsuppletie en de soortensamenstelling van de



Figuur 18. PCA ordinatiediagram van de vegetatie-opnamen as 1 tegen 2. De vegetatie-opnamen zijn ingedeeld per gebied. Elk van de gebieden is omgeven door een lijn. (AM=Ameland, GO=Goeree, NH=Noord-Holland, SC=Schouwen, Te=Texel, VL=Vlieland en WA=Walcheren).



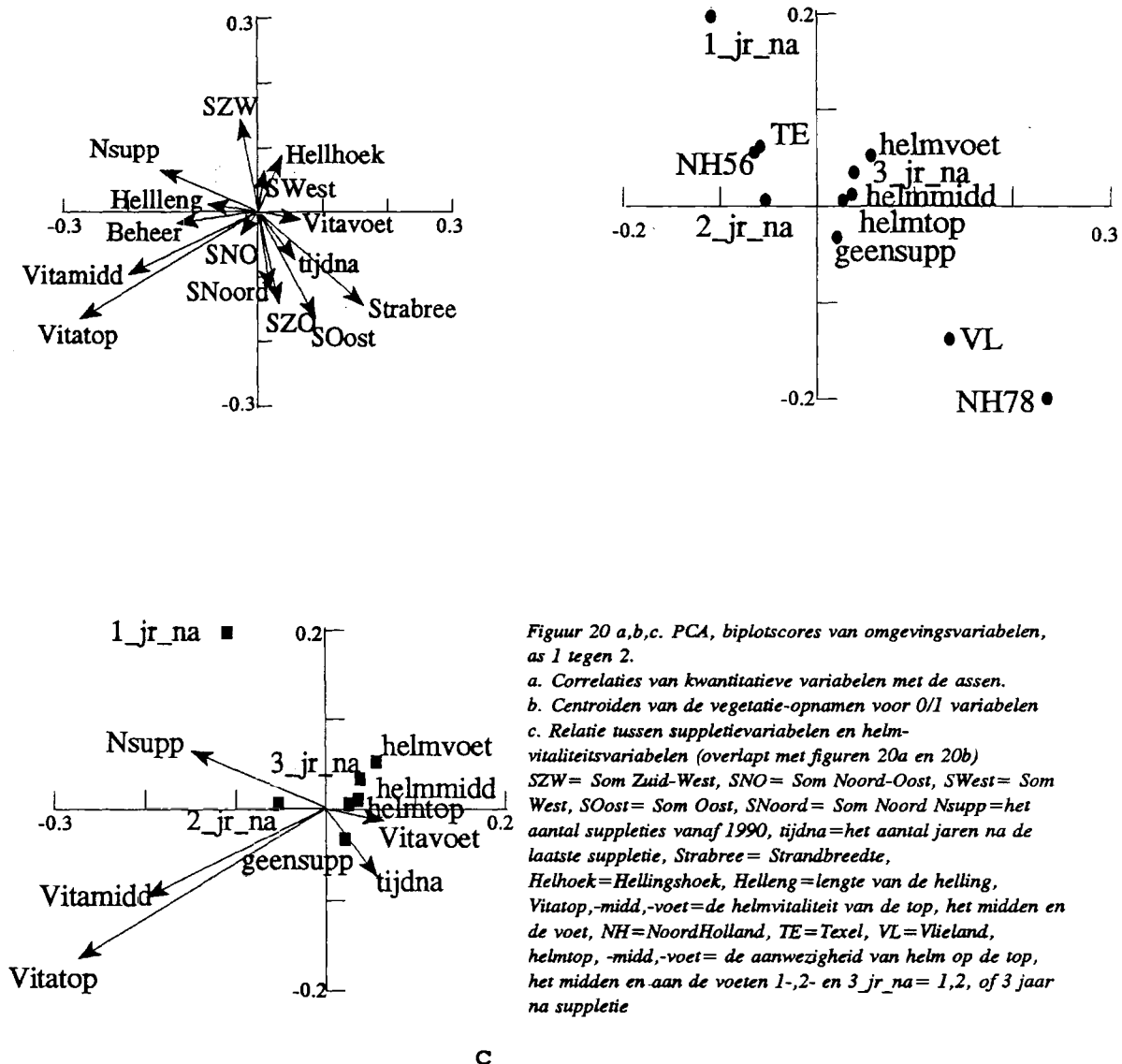
Figuur 19. PCA ordinatiediagram van de vegetatie-opnamen as 1 tegen 2. De vegetatie-opnamen zijn ingedeeld in drie klassen: geen suppletie (NSUP0), eenmalige suppletie (NSUP1) en meervoudige suppletie (NSUP2). De 3 klassen zijn elk omgeven door een lijn. (Voor gebruikte afkortingen zie figuur 18).

zeereepvegetatie en dient uitsluitend ter illustratie van het overheersende karakter van andere milieufactoren. Uit Figuur 18 blijkt, dat alle kustlokaties elkaar overlappen en dat alleen de spreiding van gebied tot gebied verschilt. Vergelijking met de Figuren 15 en 16 maakt duidelijk dat na correctie de verschillen tussen de gebieden grotendeels zijn weggefilterd. In Figuur 19 zijn dezelfde vegetatieopnamen uitgezet, echter met een andere klassenindeling, namelijk het aantal suppleties in de afgelopen jaren (0, 1 of 2). Deze figuur laat eenzelfde beeld zien: niet gesuppleerde, eenmalig gesuppleerde en meervoudig gesuppleerde kustsecties overlappen in grote mate en zijn alle geconcentreerd rond het centrum. Hieruit mag worden afgeleid dat een effect van zandsuppleties op de soortensamenstelling zeer gering zonet onaanbaar is.

Conclusie: zandsuppleties verklaren maximaal slechts 2,3% van de waargenomen verschillen in de samenstelling van de zeereepvegetatie. Gezien de geringe verklaarde variantie en de mogelijke beïnvloeding hiervan door milieuvariabelen waarvoor uiteindelijk niet gecorrigeerd is, kan met behulp van de huidige dataset geen effect van zandsuppleties op de soortensamenstelling van de zeereepvegetatie worden aangetoond.

3.4.4. Analyse van de helmvitaliteit in relatie tot zandsuppleties

In de vorige secties is met name de relatie tussen soortensamenstelling en milieuvariabelen besproken. Voor helm (*Ammophila arenaria*) zijn meer gedetailleerd gegevens verzameld: op de duinvoet, duinhelling en de top van het duin is geregistreerd of helm aanwezig is en hoe vitaal helm is. De relatie tussen milieuvariabelen inclusief zandsuppletie en helmvitaliteit of aanwezigheid van helm staat afgebeeld in Figuur 20, waarin de correlaties van de milieuvariabelen



met de assen van de Principale Componenten-Analyse zijn weergegeven. Uit deze figuur kan worden afgeleid dat in de thans verzamelde gegevensset helmvitaliteit twee jaar na zandsuppletie op het midden en op de top van de zeereep wordt gestimuleerd. Dit effect is kortstondig: in het eerste jaar werd geen effect waargenomen en in het derde jaar na zandsuppletie leek het effect negatief te zijn (Figuur 20c). Echter ook hier moet gesteld worden, dat het zeer waarschijnlijk is dat gebiedsafhankelijke variatie in bodemfactoren, expositie en geomorfologie (strandbreedte,

hellingshoek en hoogte van de duinen) op zijn minst mede-verantwoordelijk is voor de geconstateerde verschillen. De invloed van zandsuppleties op helm vitaliteit is dus gering.

Conclusie: Indien een effect van zandsuppleties op de helm vitaliteit aantoonbaar zou zijn, is dit naar verwachting zwak-positief op de helling en de top. Dit vitaliteitseffect is een jaar na suppletie nog niet aanwezig en verdwijnt ook weer na het tweede jaar.

3.4.5. Overige analyses uitgevoerd op de gegevens

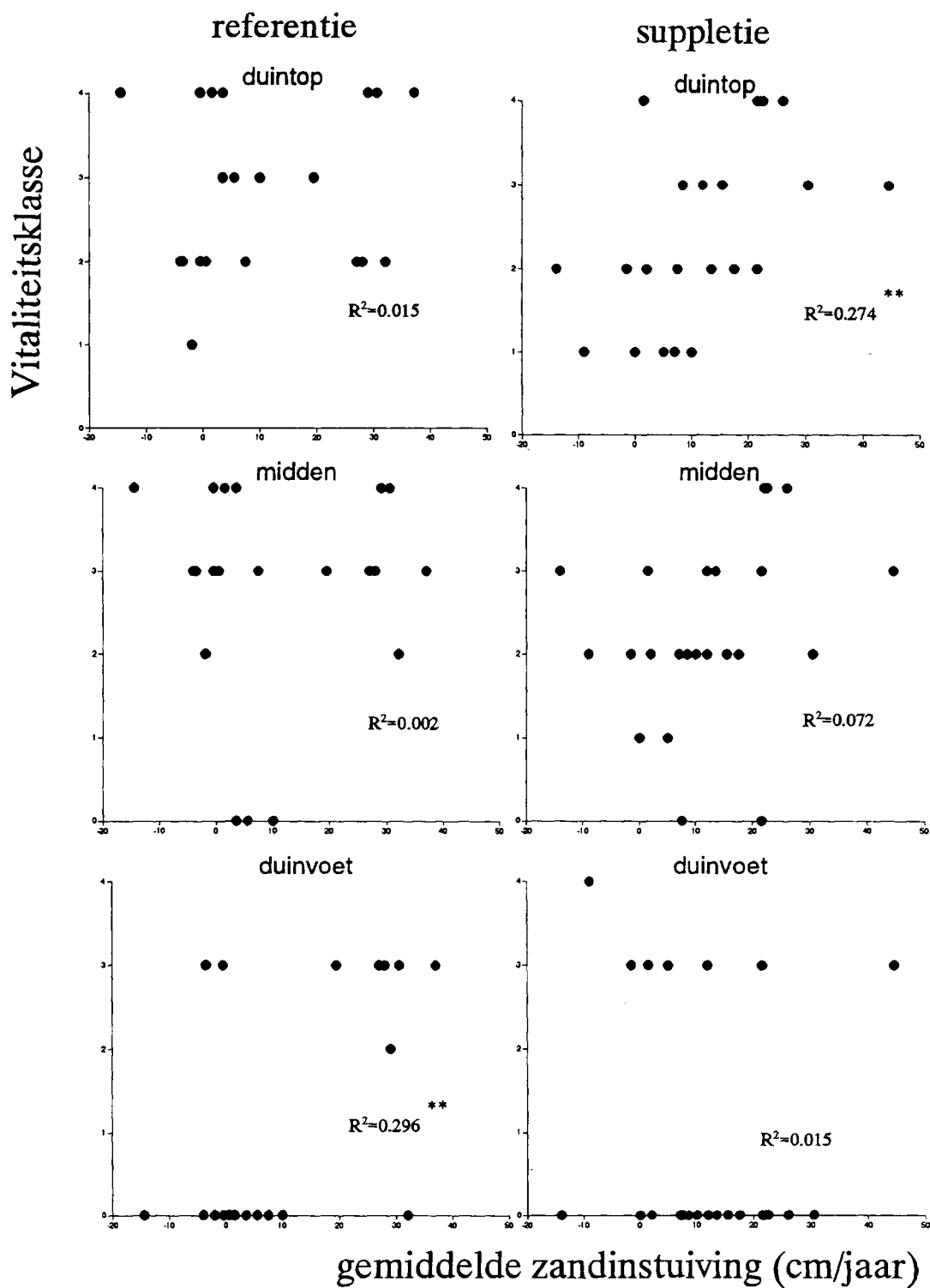
Multivariate analyse van presentie-absentiegegevens gaf in grote lijnen hetzelfde resultaat en wordt daarom in dit rapport niet besproken. Multiële lineaire regressie van milieuvariabelen op de helm vitaliteit en aanwezigheid van helm leidt tot dezelfde conclusies: Ook hier lijkt de helm vitaliteit- en aanwezigheid beïnvloed te worden door suppletievariabelen. De resultaten van de multiële regressie met voorwaartse selectie kunnen op verzoek bij de auteurs worden opgevraagd.

3.5. Koppeling veldgegevens aan JARKUS/DONAR-bestand

Bij de koppeling van de JARKUS/DONAR-gegevens met de vegetatiegegevens moet rekening worden gehouden met het feit dat het JARKUS/DONAR-bestand niet is opgezet voor vegetatiekundig onderzoek. Drie factoren maken dat de resultaten voorzichtig dienen te worden geïnterpreteerd:

- Het JARKUS/DONAR-bestand is opgebouwd uit gegevens die zijn verzameld in raaien loodrecht op de kust langs de strandpalen. De afstand tussen de raaien is, afhankelijk van de lokatie, 200-250 m. De veldgegevens daarentegen zijn verzameld door schattingen te maken van het relatieve voorkomen in de vakken tussen twee raaien. Plaatselijke variatie in instuivingspatronen tussen de strandpalen wordt niet door de JARKUS/DONAR-gegevens weergegeven, maar kan van belang zijn voor de vegetatie-ontwikkeling.
- De onnauwkeurigheid van de meetgegevens van het JARKUS/DONAR-bestand (minimaal 10 cm) is voor de interpretatie van de vegetatiegegevens nogal groot.
- De in hoofdstuk 2 berekende instuivingsgegevens vertonen grote verschillen tussen minimum en maximum zandinstuiving. Uiteindelijk zijn de berekeningen met de gemiddelde instuiving uitgevoerd, maar het maakt voor de vegetatie veel uit of er in- dan wel uitstuiving is. Tevens wordt door de JARKUS/DONAR-gegevens geen inzicht geboden in de dynamiek van de instuiving. Het is heel wel mogelijk dat een instuiving van 30 cm het netto resultaat is van 10 cm erosie en 40 cm zandaanvoer.

Daarnaast is van slechts een beperkt aantal gebieden de zandaanvoer berekend (Tabel 10). Hierdoor konden niet alle in het veld verzamelde gegevens, die in 3.4 zijn gebruikt, worden benut voor de koppeling aan de zandinstuifgegevens.



Figuur 21. Correlatie tussen helmvitaliteit op de voet, het midden en de top van de zeereep en de gemiddelde jaarlijkse zandinstuiving tussen 1991 en 1993 op de top voor referentie- en suppletiegebieden. (** geven aan dat de correlatie significant is ($P, 0.01$)).

Tabel 10. Vegetatiegegevens en de gemiddelde zandinstuiving op de top van de zeereep van vijf referentie- en vijf suppletiegebieden.

KUSTVAK	LOKATIE	STATUS	totaal aantal soorten	aantal 1-jarige soorten	aantal 2-meerjr soorten	aantal overblijvende soorten					helmvitaliteit			gemiddelde instuiving 1991-1993 (cm/jaar)
						struiken	grassen	rozet- planten	stengel- blad- planten	overige	duin- voet	midden	duin- top	
SCHOUWEN	KOP	REF	22	4	3	3	7	1	1	3	0	2	2	-2
GOEREE	KWADE HOEK	REF	23	4	3	4	5	1	1	5	1	3	3	2
AMELAND	BORNRIJF	REF	21	3	3	1	7	2	2	3	2	3	3	3
N-HOLLAND	SCHOORL	REF	16	4	1	0	5	0	0	4	0	2	3	27
AMELAND	MIDDEN	REF	4	2	0	0	2	0	0	0	0	4	4	30
WALCHEREN	WKAP-ZTL	SUP	42	10	5	6	6	2	2	11	2	2	2	1
SCHOUWEN	KOP	SUP	23	5	3	4	5	1	1	4	2	2	2	8
N-HOLLAND	BERGEN	SUP	22	4	3	5	5	1	3	4	1	2	2	11
AMELAND	MIDDEN	SUP	11	2	0	0	6	1	1	1	0	0	3	15
TEXEL	DE KOOG	SUP	7	2	0	1	3	0	1	0	3	3	4	24

Indien voor alle individuele vakken een correlatie wordt berekend tussen de helmvitaliteit en de gemiddelde zandinstuiving gemeten op de top van de zeereep in de twee aangrenzende raaien, blijkt dat de correlatie (R^2) in alle gevallen laag is. In referentievakken is de correlatie significant voor de duinvoet en in suppletievakken voor de duintop (Figuur 21). In het algemeen is echter geen duidelijke correlatie tussen de geschatte helmvitaliteit (veldgegevens van de raaiavakken uit paragraaf 3.4) en de berekende zandinstuiving (JARKUS/DONAR-gegevens uit hoofdstuk 2) vastgesteld. Uit Figuur 21 blijkt ook, dat zowel in referentie- als in suppletiegebieden een grote variatie in helmklassen voorkomt.

Indien per lokatie de gemiddelde zandinstuifgegevens uit het JARKUS/DONAR-bestand wordt uitgezet tegen het aantal soorten en de helmvitaliteit, blijkt er een trend te zijn dat naarmate de jaarlijkse zandinstuiving groter is, het aantal soorten afneemt en de helmvitaliteit toeneemt (Tabel 10). Deze trend is op grond van literatuurgegevens (bijvoorbeeld: Salisbury, 1952; Huiskes, 1979) verwacht. De trend is zowel in referentiegebieden als in suppletiegebieden aanwezig. Bij de ontwikkeling van het aantal soorten in relatie tot de zandinstuiving neemt voor elke categorie (een-, twee-, en meerjarigen, grassen, struiken, rozet- en stengelplanten) het aantal soorten af naarmate de zandinstuiving groter is. Als de zandaanvoer toeneemt, lijken tweejarigen en rozetplanten geheel te verdwijnen, hetgeen volgens verwachting is (zie paragraaf 3.4) en blijven bij de eenjarige soorten nog maar twee soorten over (Tabel 10). Deze eenjarigen zijn zeeraket en loogkruid (Tabel 11). Beide zijn vloedmerkplanten en zeer goed aangepast aan sterke milieudynamiek. Een aantal specifieke tweezaadlobbige clonale zeereepplanten, zoals zeewinde en blauwe zeedistel, komt te weinig voor om hiervoor een goede correlatie met de zandinstuiving na te gaan.

Tabel 11. Gemiddelde abundantie volgens Tansley van een aantal specifieke zeereepsoorten naast de gemiddelde instuiving van vijf referentie- en vijf suppletiegebieden.

KUSTVAK	LOKATIE	STATUS	SOORT							gemiddelde instuiving 1991-1993 (cm/jaar)
			1-jarig		2-meerjarig		overblijvend			
			Zee- raket	Loog- kruid	Veld- honds- tong	Jacobs- kruis- kruid	Zee- melk- distel	Zee- winde	Blauwe zee- distel	
SCHOUWEN	KOP	REF	0.4	0.6	0.4	0.8	2.4	0	0	-2
GOEREE	KWADE HOEK	REF	2.83	2.67	1.67	1.17	2.33	0	0	2
AMELAND	BORNRIJF	REF	0.88	0	0.13	0.75	1.75	0	0	3
N-HOLLAND	SCHOORL	REF	3.33	2	0.33	0	3	0	0	27
AMELAND	MIDDEN	REF	0.43	0.29	0	0	0	0	0	30
WALCHEREN	WKAP-ZTL	SUP	0.83	0.17	0.13	1.83	2.67	0	1.17	1
SCHOUWEN	KOP	SUP	1.25	0.88	1.25	1.25	0.63	0	0	8
AMELAND	MIDDEN	SUP	0	0.2	0	0	1.2	0	0	11
N-HOLLAND	BERGEN	SUP	2.78	1	0	0.56	3	0	1.78	15
TEXEL	DE KOOG	SUP	1	0.33	0	0	1.83	0	0	24

Ten aanzien van zandsuppletie kan het volgende geconcludeerd worden.

- *De koppeling van de veldgegevens van helm vitaliteit en soortensamenstelling aan de zandinstuifgegevens van het JARKUS/DONAR-bestand bevestigt in grote lijnen de relatie die reeds in de literatuur beschreven is: naarmate de zandinstuiving toeneemt, neemt de helm vitaliteit toe en het aantal begeleidende soorten af. Echter, aangezien het JARKUS/DONAR-bestand slechts raaien om de 200 of 250 meter bevat en de foutenmarge voor vegetatiedoeleinden groot is, kunnen op lokale schaal (en op grond van de metingen van een jaar) weinig conclusies aan de zandinstuifgegevens worden verbonden ten aanzien van de helm vitaliteit.*
- *Zowel in referentiegebieden als in suppletiegebieden komen lokaties voor met weinig (-2 - 5 cm/jaar) als matige (5-30 cm/jaar) gemiddelde instuiving. In beide gevallen is er eenzelfde trend in helm vitaliteit en soortensamenstelling in relatie tot de gemiddelde zandinstuiving.*
- *Koppeling van de zandinstuifgegevens van het JARKUS/DONAR-bestand aan de vegetatiegegevens biedt geen nader inzicht in eventuele effecten van zandsuppletie.*
- *Ten aanzien van de effecten van het gebruik van "vreemd" zand voor de ontwikkeling van de helm vitaliteit ondersteunden de veldgegevens de algemene gedachte dat het kalkgehalte van het zand een belangrijke milieufactor vormt voor de soortensamenstelling van de vegetatie. In hoeverre het gebruik van kalkrijk zand op kalkarme locaties (en omgekeerd) tot veranderingen in de vegetatie leidt, kan met behulp van deze haalbaarheidsstudie niet worden vastgesteld.*
- *De literatuur bevat geen informatie waaruit eventuele effecten van veranderde korrelgroottesamenstelling als gevolg van zandsuppletie op de helm vitaliteit of de soortensamenstelling kunnen worden afgeleid.*

3.6. Toekomstige monitoring helm vitaliteit en soortensamenstelling m.b.t. zandsuppleties

3.6.1. Mogelijke doelstellingen

Voorafgaand aan de opzet van een monitoringprogramma dient te worden vastgesteld wat het doel is. We willen twee uiteenlopende doelstellingen voor monitoring van vegetatie van zeeuerende duinen onderscheiden:

- a. Op landelijke schaal vervolgen van de helm vitaliteit en soortensamenstelling van zeeuerende duinvegetatie als gevolg van de uitgevoerde zandsuppleties teneinde de effecten van zandsuppleties te evalueren en desgewenst bij te sturen in het geval van ongewenste gevolgen.

In dit geval zou de activiteit het beste centraal kunnen worden gecoördineerd vanuit het zandsuppletieprogramma. De methodiek zoals beschreven onder 3.1.4 zou voor zo'n programma geschikt zijn en indien een meerjarige dataset wordt verkregen, zullen op den duur duidelijkere uitspraken ten aanzien van de effecten van zandsuppleties kunnen worden gedaan. Deze aanpak heeft als voordeel dat de effecten van zandsuppleties op de vegetatie-ontwikkeling op hetzelfde (landelijke) niveau worden geëvalueerd als waar de besluitvorming over zandsuppleties plaatsvindt. Echter, de vraag is wat deze aanpak voor het locale beheer oplevert. Op grond van paragraaf 3.4 is geconcludeerd dat er geen

duidelijke effecten van zandsuppleties konden worden waargenomen. Plaatselijk worden echter af en toe negatieve effecten van zandsuppleties op de helm vitaliteit gemeld. Blijkbaar is de landelijke aanpak niet geschikt om eventuele incidentele gevallen op te sporen waar de helm vitaliteit zich niet goed ontwikkelt. Evenmin blijkt uit de landelijke inventarisatie in welke gevallen zandsuppletie een positief effect heeft op de helm vitaliteit, de soortensamenstelling, of de mate van voorkomen van de verschillende soorten opdat van de successie zou kunnen worden geleerd. Verwacht wordt dat de lokale effecten van zandsuppleties beter kunnen worden waargenomen indien de monitoring op het lokale schaalniveau wordt afgestemd.

- b. Op lokale schaal nagaan wat de effecten van individuele zandsuppleties zijn op de helm vitaliteit en op de soortensamenstelling van de zeewerende duinvegetatie.

In dit geval zou de activiteit zowel landelijk als door de plaatselijke beheerder kunnen worden gecoördineerd en uitgevoerd. Het is zelfs mogelijk eventuele effecten van een zandsuppletie op de ontwikkeling van de helm vitaliteit al in een vroeg stadium te kunnen voorspellen, aangezien de helm groei in de zomer reageert op de mate van zandinstuiving in de voorgaande winter. Als blijkt dat de zandinstuiving minimaal is, kan worden voorspeld dat de helm vitaliteit niet bevorderd wordt en dat vitale helm er op achteruit zal gaan. Hiertoe is een relatief eenvoudige methode te bedenken die door de beheerder zelf kan worden uitgevoerd. Voor wat betreft de soortensamenstelling en de mate van voorkomen van verschillende plantesoorten ligt het wat ingewikkelder, omdat niet iedereen de betreffende plantesoorten kent. Tevens dient soortenkennis voortdurend op peil gehouden te worden. De aanpak van monitoring op lokale schaal is in het vervolg verder uitgewerkt.

3.6.2. Plan van aanpak voor monitoring op lokaal niveau

Tijdreeksen of referentiegebieden?

Om na te gaan of zandsuppleties invloed hebben op de vragen die gesteld zijn, is het noodzakelijk al te beginnen met monitoren voordat de suppletie wordt uitgevoerd. Door langere tijd te monitoren, kunnen trends worden vastgesteld. Indien dit niet kan of niet gedaan is, kan eventueel een vergelijking plaatsvinden door referentiegebieden te kiezen. Aan beide mogelijkheden kleven bezwaren: Indien te kort voor de uitvoering van zandsuppletie wordt begonnen met het starten van een meetreeks, kunnen eventuele verschillen tussen de opvolgende jaren, die mogelijk het gevolg zijn van verschillen in weersgesteldheid, ten onrechte worden geïnterpreteerd als verschillen ten gevolge van zandsuppleties. Door gedurende langere tijd te meten, wordt beter inzicht verkregen in natuurlijke variatie tussen opeenvolgende jaren. Het voordeel van referentiegebieden is, dat vergelijkingen tussen suppletie- en niet-suppletiegebieden steeds in één jaar kunnen worden gemaakt. Hierdoor wordt de interpretatie van de gegevens niet beïnvloed door groeiverschillen tussen opeenvolgende jaren. Echter, aangezien de ontwikkeling van de helm vitaliteit en de soortensamenstelling door veel verschillende milieufactoren worden beïnvloed, is het moeilijk een vergelijkbaar gebied te vinden dat als referentie kan dienen.

Voor tijdreeksen geldt dus als uitgangspunt dat een gebied gedurende langere tijd wordt vervolgd. Voor de keuze van referentiegebieden geldt, dat moet worden nagegaan waaraan een referentiegebied dient te voldoen. Uit het veldonderzoek dat in paragraaf 3.4 beschreven is, kunnen de criteria, waaraan een referentiegebied moet voldoen, worden afgeleid. Uit Tabel 8 blijkt dat van alle verschillende milieuvariabelen het kalkgehalte de meeste variantie verklaart (13%). Een referentiegebied dient dus bij voorkeur in hetzelfde kalkdistrict te liggen. Vervolgens

blijkt de lokatie een belangrijk deel van de variantie te verklaren (Noord-holland Ameland en Walcheren). Bij voorkeur dient een referentiegebied dus in hetzelfde kustvak te liggen als het suppletiegebied. De volgende sturende variabele is de lengte van de helling. De zeereep van een referentiegebied moet zoveel mogelijk een gelijke hoogte, hellingshoek en hellingslengte hebben als de zeereep waarvoor gesuppleerd wordt. Als laatste criteria waaraan een referentievak aan moet voldoen is dat de expositie van de zeereep zoveel mogelijk overeenkomt met die van het suppletiegebied.

Als *conclusie* geldt dus dat een referentiegebied bij voorkeur naast het suppletiegebied dient te liggen, maar dat, in het geval dit niet mogelijk is, bij voorkeur binnen hetzelfde kalkdistrict en vervolgens bij voorkeur in hetzelfde kustvak een lokatie dient te worden gezocht die qua lengte van de helling zoveel mogelijk overeenkomt met die van het suppletiegebied.

Bepaling helmvitaliteit

De bepaling van de helmvitaliteit is de meest eenvoudige methode om na te gaan of er effect is van zandsuppleties. De vitaliteit kan worden ingedeeld in 4 klassen (zie Tabel 3): zwaar degenererend, degenererend, vitaal en zeer vitaal.

De helmvitaliteit is sterk afhankelijk van de zandinstuiving. Aangezien de zandinstuiving niet over de gehele zeewaartse helling gelijk hoeft te zijn, kan de zeewaartse helling het best in segmenten worden ingedeeld voor de bepaling van de helmvitaliteit. Tijdens het veldwerk bleek, dat indeling van het zeewaardse talud duinvoet, middenstuk en duintop in het algemeen een goed onderscheid gaf. Als het noodzakelijk is (bij een hoge duintop bijvoorbeeld) kan de helling nog verder worden onderverdeeld.

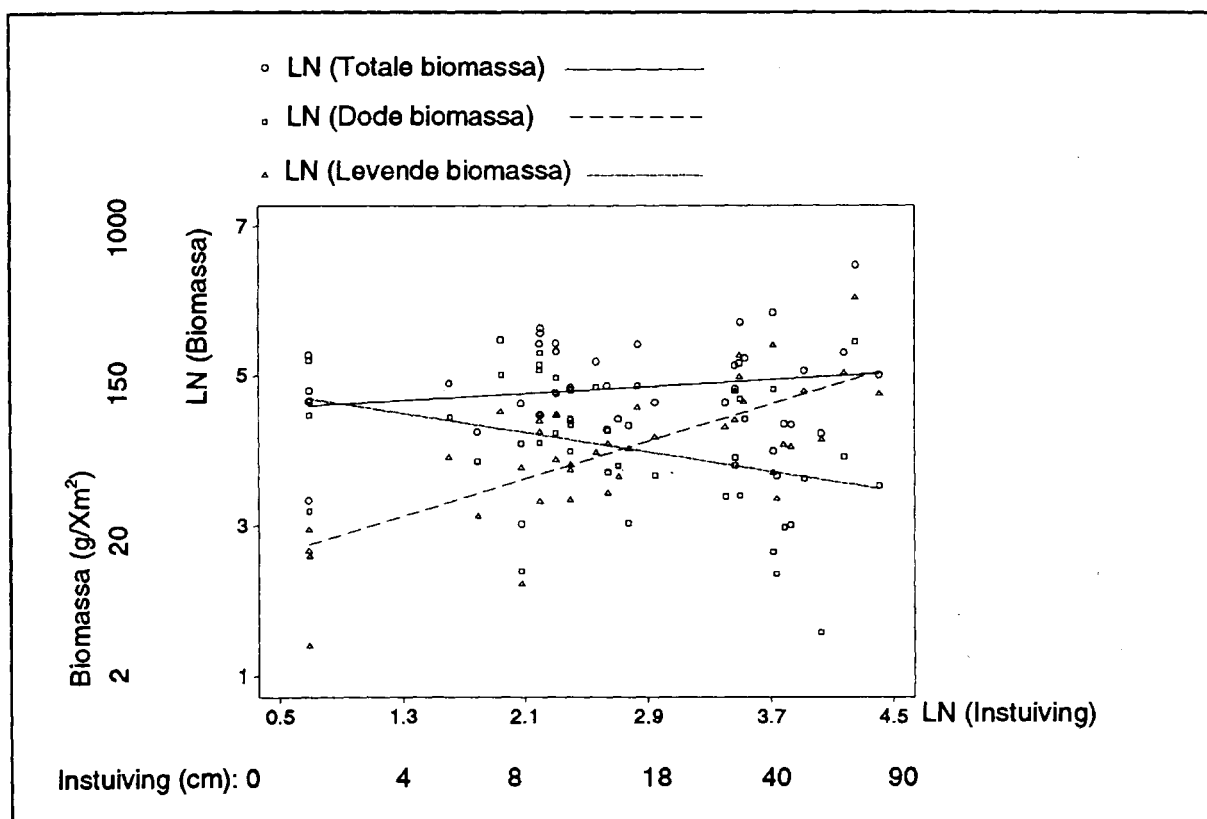
Voorspelling ontwikkeling van de helmvitaliteit

Het is mogelijk de ontwikkeling van de helmvitaliteit te voorspellen op grond van de zandinstuiving in de voorafgaande winter. De zandinstuiving kan op verschillende manieren gemeten worden.

- **Erosiepinnen.**
Erosiepinnen zijn te kwetsbaar voor gebruik in de zeereep. Lange pinnen worden gemakkelijk weggenomen, terwijl kortere pinnen de kans lopen onder het ingestoven zand te verdwijnen (De Rooij-Van der Goes en Jungerius, 1994).
- **Tachymeter.**
Het gebruik van tachymeters geeft een nauwkeurig, resultaat maar is tijdsintensief en afhankelijk van relatief windstil weer (De Rooij-Van der Goes en Jungerius, 1994).
- **Zandvangers.**
Het gebruik van zandvangers is ook tijdsintensief en het heeft als nadeel (evenals de tachymeter) dat het geen informatie geeft over de totale hoeveelheid zand die per jaar instuift.
- **JARKUS/DONAR-bestand**
De gegevens van het JARKUS/DONAR-bestand zijn te onnauwkeurig om op kleine schaal een effect op de helmvitaliteit vast te stellen (zie paragraaf 3.5)
- **Afstand tussen knopenstapels bij helm meten.**

Aan het eind van elk groeiseizoen vormt de helmplant op de ondergrondse stengel direct onder het zandoppervlak een aantal knopen dicht op elkaar. Door helmplanten uit te graven, laten deze zogenaamde knopenstapels zich lezen als ware jaarringen. Immers, elk voorjaar beginnen op plaatsen waar zand is ingestoven de helmstengels zich boven de bovenste knopenstapel te strekken. Direct onder het nieuwe zandoppervlak wordt in de loop van het groeiseizoen weer een nieuwe knopenstapel gevormd. Door de afstand tussen de knopenstapels te meten (hart op hart of van bovenkant tot bovenkant), kan worden nagegaan hoeveel zand er in een bepaald jaar is ingestoven. In het geval regelmatig zandinstuiving optreedt, kan de instuiving tot enkele jaren terug worden vastgesteld.

Van deze methode is gebruik gemaakt bij een proefbemonstering bij Groote Keeten. Daar is in juli 1993 de instuiving van het voorgaande jaar bepaald en uitgezet tegen de biomassaproductie van de planten (Figuur 22). Ondanks de grote spreiding is het duidelijk dat naarmate de instuiving afneemt de levende biomassa ook afneemt, terwijl de dode biomassa toeneemt. Het bezwaar van deze voorstudie is, dat de bemonstering te vroeg in het groeiseizoen heeft plaatsgevonden en dat de relatie met de zandinstuiving niet door andere methoden (b.v. met erosiepinen) gecontroleerd is. Daarom zou nader onderzoek wenselijk zijn om de relatie tussen zandinstuiving en helm vitaliteit verder uit te werken. Indien dan ook de zandinstuiving van eerdere jaren wordt meegenomen, kan worden nagegaan in hoeverre deze effecten meewegen bij de uiteindelijke helmontwikkeling in het meest recente groeiseizoen. Tevens kan dan worden vastgesteld hoeveel zand minimaal dient in te stuiven wil de helmbegroeiing vitaal blijven.



Figuur 22. Relatie tussen de natuurlijke logaritme ($\ln$) van de zandinstuiving en natuurlijke logaritme ($\ln$) bovengrondse biomassa van helm.

- Door gebruik te maken van Remote Sensing. Hiertoe is recent een operationeel systeem

ontwikkeld (Derksen, Löffler en Kloosterman, 1994).

3.6.3. Soortensamenstelling en abundantie van de vegetatie

Bij het maken van vegetatie-opnamen moet van te voren een aantal beslissingen worden genomen.

- Het opnametijdstip.

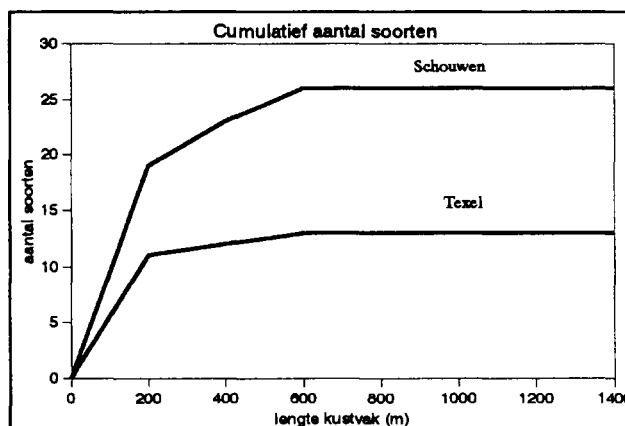
In ons Nederland zijn de meeste vegetaties slechts gedurende een deel van het jaar, in het groeiseizoen, goed ontwikkeld. De opnames dienen in deze tijd te worden gemaakt. Het is raadzaam de opname niet te vroeg in het groeiseizoen te maken, omdat grassen het eenvoudigst te herkennen zijn als ze bloeien. Ook de kans dat soorten die nog moeten kiemen of uitlopen worden gemist, is dan het kleinst. Het nadeel is dat soorten die vroeg in het seizoen bloeien moeilijk terug te vinden zijn. Voor de zeeuerende duinen is in het algemeen de periode juni - juli het meest geschikt. In het geval tijdreeks opnamen worden gemaakt, is het wel van belang de opnamen elk jaar in dezelfde periode te maken.

- De plaats van het proefvak.

Voor de soortensamenstelling dient de hele zeewaartse helling te worden beschouwd, omdat sommige soorten vooral beneden en andere soorten eerder midden of boven op de helling voorkomen.

- De grootte van het proefvak.

Een afweging kan worden gemaakt om veel kleine proefvakken op te nemen of enkele grote. Voor het veldwerk, dat tijdens deze studie is uitgevoerd, is besloten de grootte van de proefvakken te laten bepalen door de afstand tussen twee opeenvolgende strandpaalraaien. De vakken waren daardoor 200-250 meter lang en de breedte was gelijk aan de lengte van de zeewaarts helling. De inspanning voor het maken van een opname werd hierdoor geminimaliseerd en in elke opname was ca. 75 % van alle plantesoorten aanwezig die in het betreffende kustvak voorkwamen (Figuur 23).



Figuur 23. Cumulatief aantal gevonden soorten in de zeeleep per lengte van het opgenomen kustvak op de locaties Schouwen en Texel.

- De opnamemethode

De vegetatie kan worden beschreven door een soortenlijst van de in het proefvak aangetroffen plantesoorten en door de mate waarin de betreffende plantesoorten in het proefvak voorkomen.

Het is noodzakelijk, om opnamen te kunnen maken, de flora van het gebied grondig te kennen door de waarnemer zich van te voren goed te laten inwerken. Dit geldt zeker voor mossen. Bij hogere planten is in het begin de grote moeilijkheid dat een aantal soorten alleen vegetatief (zonder bloemen) in het proefvak voorkomen. Groeit de soort ook buiten het proefvak of in een ander stuk duin alleen in vegetatieve toestand, zodat nog geen herkenning mogelijk is, dan zijn er voor sommige plantengroepen (oa. de grassen) vegetatieve tabellen beschikbaar. De overige soorten moeten door ervaring in vegetatieve

toestand te herkennen zijn.

De analyse van de vegetatie houdt in dat niet alleen onderscheid gemaakt wordt welke soorten er in het proefvak voorkomen, maar ook hoeveel exemplaren er van elke soort zijn. Alle individuen tellen is zeer tijdrovend en over het algemeen hoeven de metingen niet zó nauwkeurig te zijn. Daarom wordt het aantal (abundantie) van de planten geschat volgens een speciale methode. Volgens de schaal van Tansley, een van de meest eenvoudige schattingsschalen, wordt per plantensoort met een symbool het geschatte aantal individuen van één soort weergegeven.

De symbolen volgens de schaal van Tansley en hun betekenis zijn (tussen haakjes zijn de aantallen planten per 200 of 250 meter zeewerend duin aangegeven zoals ze tijdens het veldonderzoek zijn ingedeeld; zie paragraaf 3.1.3):

s = (sporadic) de soort is zeer zeldzaam, slechts enkele exemplaren aanwezig (1-5 exemplaren).

r = (rare) de soort is zeldzaam (5-10 exemplaren).

o = (occasional) de soort is schaars, af en toe, hier en daar voorkomend (10-50).

f = (frequent) de soort is minder talrijk, maar (nog) niet schaars (> 50).

a = (abundant) de soort is zeer veel aanwezig, maar nooit (co)-dominant

c = (co-dominant) de soort overheerst samen met andere soorten

d = (dominant) de soort overheerst

Indien de gegevens verwerkt gaan worden door middel van multivariate technieken moeten de symbolen (s-d) vervangen worden door getallen (1-7).

Een voorbeeld van een vegetatie-opname is in Figuur 24 weergegeven.

- Milieuvariabelen

Eventueel kunnen tijdens de opname milieuvariabelen worden genoteerd. Voorbeelden van milieuvariabelen zijn genoemd in paragraaf 3.1.3.

- Verwerking van de vegetatieopnamen

Door elk jaar vegetatieopnamen te maken op dezelfde plek kan door eenvoudige vergelijking worden nagegaan of er soorten verdwijnen, zich uitbreiden of zich vestigen.

Door meer proefvlakken te kiezen of een bepaald kustvak in stukken in te delen, kan een globaal beeld van de vegetatie verkregen worden door een lijst te maken waarin het aantal opnamen waarin elke soort voorkomt wordt aangegeven. Op deze manier wordt alleen naar aan- of afwezigheid van soorten gekeken, maar er kan ook een gemiddelde van de Tansley-schaal berekend worden. Om een overzichtelijke tabel te krijgen worden de soorten gerangschikt naar hun presentie: De soort die het meeste voorkomt komt bovenaan de tabel en de soort die het minst voorkomt onderaan.

Door naast suppletiegebieden ook referentiegebieden mee te nemen in het programma kunnen trends die worden gevonden, worden vergeleken met referentiegebieden.

Datum: 22-06-1994			
Kustvak: Bornrif			
Lokatie: Ameland	helmvitaliteit		
Paalnr: 340-360		Duinvoet:	0
		Midden:	3
strand: Cakile maritima	R	Top:	3
Ammophila arenaria	D	Hippophae rhamnoides	
Cakile maritima		Honckenya peploides	
Calamagrostis epigejos	S	Hypochaeris radicata	
Callamophila baltica	A	Leontodon saxatilis	S
Calystegia soldanella		Leymus arenarius	R
Carex arenaria		Oen parv var amm	
Centaurium littorale		Phleum arenarium	
Cerastium fontanum		Rubus caesius	
Cerastium semidecandrum		Salsola kali	
Cirsium arvense		Senecio jacobea	
Cirsium vulgare	R	Senecio sylvatica	
Cynoglossum officinale		Senecio vulgaris	S
Elymus athericus	R	Solanum dulcamara	
Elymus farctus	R	Solanum triflorum	
Erigeron canadensis		Sonchus arvensis maritima	R
Erodium glutinosum		Stellaria pallida	
Eryngium maritimum			
Euphorbia paralias			
Festuca rubra ssp. arenaria	O		
Glaucium flavum			
Opm. gedeeltelijke afslag duinvoet			

Figuur 24. Voorbeeld van een vegetatieopname.

4. AANBEVELINGEN VOOR TOEKOMSTIGE ZANDSUPPLETIES

4.1. Onderzoek op de winlokatie

Ofschoon de verschillen in aanstuiving en variatie in helmvitaliteit en soortensamenstelling tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde kustgedeelten als geheel binnen de variatie liggen die de zeereep langs de gehele Nederlandse kust van nature kent, zijn er aanwijzingen dat er lokaal effecten zijn op de verstuiwing en daarmee op de helmvitaliteit en soortensamenstelling. Tevens bestaan er kansen om met zandsuppletie gedegenereerde helm te verbeteren. Onderzoek en monitoring kunnen hierbij de helpende hand bieden.

In de potentiële wingebieden is zowel kwantitatief als kwalitatief (beschrijvend) onderzoek naar de samenstelling van het zand voor dit doel van belang.

- Het aantal boringen dat in het wingebied moet worden gezet om een goede voorspelling over het stuifgedrag van het zand in het veld te kunnen maken, kan niet uit de resultaten van dit onderzoek worden afgeleid. Voor ieder wingebied zou een geostatistisch onderzoek moeten worden uitgevoerd om de horizontale en verticale variatie in de samenstelling van sediment in kaart te brengen. Het blijkt dat drie boringen het zand in het wingebied van de suppletie Camperduin-Egmond goed beschrijven, maar dat zeven korrelgrootte-analyses en twaalf boringen in het wingebied Schulpengat zeker nodig zijn om de materiaaleigenschappen van dit zand te kennen.
- De korrelgrootte-verdeling is zeer belangrijk bij de stuifgevoeligheid van zand. Suppletiezand is in een aantal gevallen slecht gesorteerd en geschikt voor compactie omdat tijdens de suppletiewerkzaamheden zand met verschillende korrelgrootte-verdelingen wordt gemengd. Daarom is het bepalen van alleen de mediaan d_{50} niet voldoende om het zand te karakteriseren, maar moeten ook de percentielen d_{10} , d_{60} en d_{90} per laag worden berekend. De percentielen zijn vaak niet bekend als met een vergelijkingsmicroscop is gewerkt.
- Standaardisering van de wijze waarop de korrelgrootte-verdeling is bepaald, is gewenst. Verschillende methoden geven niet alleen verschillende uitkomsten voor de mediaan d_{50} , maar ook voor de percentielen d_{10} , d_{60} en d_{90} . Onderzoek naar de relaties tussen de uitkomsten van met verschillende methoden bepaalde medianen moet worden voortgezet en worden uitgebreid met onderzoek naar relaties tussen de uitkomsten van andere percentielen.
- Het verdient aanbeveling het percentage klei en silt in het zand te bepalen. Voor een indicatie van het gehalte aan fijne organische stof in het zand kan ook het best met percentages worden gewerkt.
- De kwalitatieve beschrijving van de boorkernen door de Rijks Geologische Dienst (met een schatting van het voorkomen en de hoedanigheid van klei, silt, grind, organische stof en schelpen) is, naast de korrelgrootte-analyse, essentieel bij de voorspelling van het stuifgedrag. Op alle boorstaten moet wel worden vermeld of de zandlagen (zwak) slibhoudend zijn, hetgeen nog niet altijd gebeurt. Verder kan dit onderzoek onveranderd worden voortgezet.
- Door de Rijks Geologische Dienst wordt het kalkgehalte op de winlokatie door middel van een kwalitatieve proef bepaald. In hoeverre dit voldoet is niet bekend. Uit het onderzoek is gebleken dat het kalkgehalte een relatief groot deel van de variatie in vegetatie verklaart. Nader onderzoek naar de invloed van de hoeveelheid kalk en de vorm waarin kalk voorkomt

(bijvoorbeeld als grove schelpfragmenten of als zeer fijne deeltjes) op de hoeveelheid kalk die met het suppletiezand in de zeereep terechtkomt, is gewenst.

4.2. Keuze van het suppletiezand

Voor het instandhouden van een geregeld zandtransport ten behoeve van de helmvitaliteit en duinvorming, is de samenstelling van het suppletiezand van belang. Ook andere duinfuncties stellen eisen aan de materiaaleigenschappen: met name voor de waterwinning en bebouwing mag de overstuiving niet te groot zijn, voor de recreatie zijn klei-, veen- en schelpenbanken ongewenst, terwijl deze uit oogpunt van verdediging van het achterland tegen overstroming niet nadelig zijn.

Kwalitatieve eisen die aan het suppletiezand moeten worden gesteld kunnen niet los worden gezien van de materiaaleigenschappen van het zand dat voor de suppletie aanwezig was. Een voorbeeld hiervan is het verschil in kalkgehalte en de ermee samenhangende vegetatiesamenstelling tussen het gebied benoorden en bezuiden Bergen (Eisma, 1968). Juist voor het van nature kalkarme gebied ten noorden van Bergen is het essentieel dat er weinig of geen kalktoevoer plaatsvindt.

In dit opzicht is het belangrijk dat voorafgaand aan het opbrengen van een zandsuppletie monsters van het van nature aanwezige zand worden genomen. Omdat op veel plaatsen al minstens eenmaal een suppletie is opgebracht, is dit helaas niet overal meer mogelijk.

- Uit windtunnelgegevens blijkt dat de mediaan niet zonder meer evenredig is met de verstuiving. Als rekening gehouden moet worden met de stuifgevoeligheid van zand, moet naast de mediaan bij het kiezen van een winlokatie ook andere aspecten van de korrelgrootteverdeling in ogenschouw worden genomen, met name d_{60}/d_{10} en de sortering.
- De koppeling tussen de resultaten van de korrelgrootte-analyse en de windtunnelproeven heeft geleid tot de onderstaande tweedeling:

Stuifgevoelig zand (d.i. zand waarvan meer dan 55% tijdens de windtunnelexperimenten is verstoven) heeft de volgende eigenschappen:

- $U = d_{60}/d_{10} < 1.5$
- $S = d_{90}/d_{10} < 2$
- maximale gewichtsfractie van drie aangrenzende 0.5 phi-zeeffracties is meer dan 70%
- zeer goed (eventueel goed) gesorteerd, bijna symmetrische verdelingskromme of fijne staart, leptokurtic
- gewichtsfractie deeltjes kleiner dan $75 \mu\text{m}$ minder dan 0.05%
- gewichtsfractie deeltjes 600-2000 μm is minder dan 1%.
- geen deeltjes groter dan 2000 μm
- zeer weinig differentiatie in de zandlagen (in het wingebied).

Voor weinig stuifgevoelig zand (d.i. zand waarvan minder dan 45% tijdens de windtunnelexperimenten is verstoven) geldt:

- $U = d_{60}/d_{10} > 1.65$
- $S = d_{90}/d_{10} > 3$
- maximale gewichtsfractie van drie aangrenzende 0.5 phi-zeeffracties is minder dan 60%
- slecht tot redelijk goed gesorteerd, negatieve (grote staart) of zeer positieve scheefheid (duidelijke fijne staart), soms platykurtic
- gewichtsfractie deeltjes kleiner dan $75 \mu\text{m}$ is meer dan 0.10%
- gewichtsfractie deeltjes groter dan 600 μm is meer dan 8%.

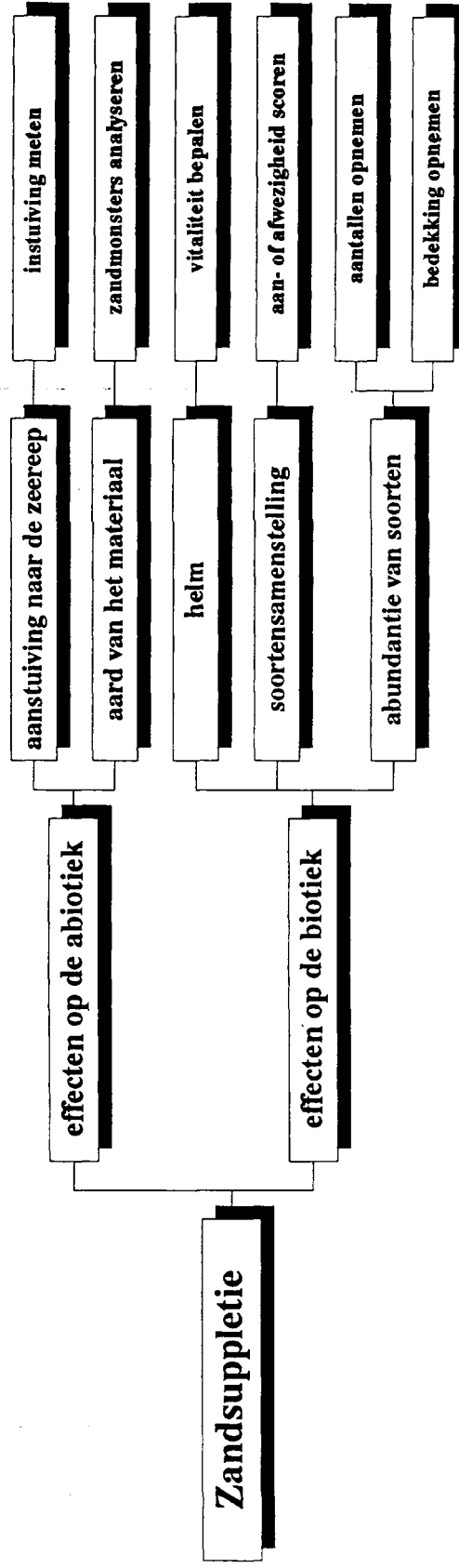
- Voor het stimuleren van natuurlijke duinvorming wordt tot slot afgeraden zand met klei- en siltlagen, (zwak) slibhoudend zand, zand met veel organische stof en/of schelpen, schelpfragmenten en schelpgruis te gebruiken voor zandsuppleties.

4.3. Monitoring van de effecten van zandsuppleties

Aanbevolen wordt een meerjarig monitoringsprogramma uit te voeren in samenwerking met de kustbeherende instanties om de ecologische effecten van zandsuppleties objectief te kunnen volgen. Een voorstel voor een schema voor monitoring (van winplaatskeuze tot en met vegetatieontwikkeling) is gepresenteerd in Figuur 25.

- Een monitoringsprogramma zal bij voorkeur vier jaar moeten beslaan, te beginnen met een jaar voorafgaand aan een geplande suppletie en doorlopend tot drie jaar nadat de zandsuppletie is opgebracht.
- Een aantal malen voor en na het opbrengen van de zandsuppletie moeten monsters van strand- en zeereepzand worden geanalyseerd.
- Karakteristieke veranderingen in de erodeerbaarheid van het oppervlak (bijvoorbeeld de vorming van schelpenvloertjes) moeten regelmatig worden opgenomen.
- Door voor en na zandsuppleties de vegetatie op te nemen en de helm vitaliteit te schatten, kan het effect van individuele zandsuppleties beter worden bepaald dan op grond van een eenmalige landelijke inventarisatie.
- De knopenontwikkeling van helmplanten in relatie tot zandinstuiving kan worden gebruikt om de zandinstuiving ter plaatse te bepalen. Tevens zou de knopenontwikkeling als voorspellingsmethode kunnen worden gebruikt om effecten van zandsuppletie een jaar vooruit te voorspellen. Hiertoe is aanvullend onderzoek nodig.

monitoring



Figuur 25. Schematische weergave voor monitoring van de effecten van zandsuppleties.

5. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

5.1. Invloed van zandsuppletie op het stuifgedrag van zand

Probleemstelling

De factoren die effect hebben op de aanstuiving van zand naar de zeereep wend hun invloed aan door de beschikbaarheid van zand te wijzigen, door het induceren van veranderingen in de erosiviteit van de wind, of door de erodeerbaarheid van het oppervlak te beïnvloeden (Figuur 1). Zandsuppletie heeft op alle drie manieren invloed.

Hoewel slechts lokaal (positieve en negatieve) effecten van zandsuppletie op de aanstuiving zijn aangetoond, als gevolg van de grote variatie in aanstuiving langs de Nederlandse kust en vanwege de voor dit doel vrij onnauwkeurige methode die is gebruikt om de zandaanstuiving te bepalen, is het nodig te weten op welke wijze de parameters de aanstuiving beïnvloeden, en zo mogelijk de effecten op de aanstuiving te kwantificeren, ten einde reeds bij het ontwerpen van een zandsuppletie eventuele negatieve effecten op de aanstuiving en daarmee op de zeereepontwikkeling, de helm vitaliteit en de soortensamenstelling te voorkomen.

- a. Van de factoren zijn in dit kader met name de grootte en vorm van een zandsuppletie en de plaats van een zandsuppletie in het dwarsprofiel niet voldoende onderzocht. Mogelijk draagt deze factor bij aan de op een aantal lokaties waargenomen toename in de aanstuiving en helm vitaliteit twee jaar na suppletie. De bodemvochtcondities van het zand kunnen als gevolg van veranderingen in de hoogteligging gunstiger worden voor zandtransport. Daarnaast kunnen veranderingen in de topografie van strand en zeereep door suppletie de erosiviteit van de wind en daarmee het sedimentatiepatroon veranderen. Een hoog klif van een duinfrontsuppletie bijvoorbeeld kan het zandtransport van strand naar de zeereep verhinderen, en de slechts smalle strook waarop de wind op de duinfrontsuppletie zelf kan aangrijpen, kan in combinatie met een lage stuifgevoeligheid van het suppletiezand een verminderde aanvoer van zand naar de zeereep tot gevolg hebben. Tot slot moet gekeken worden naar de rol van de plaats en de vorm van een zandsuppletie in relatie tot omwoeling en fragmentatie van schelpen door de zee en het optreden van sorterende processen.
- b. Uit dit onderzoek blijkt dat de erodeerbaarheid van het oppervlak sterk kan worden gewijzigd als gevolg van zandsuppletie. Op alle onderzoekslokaties was het suppletiezand minder stuifgevoelig dan het zand uit een nabijgelegen niet-gesuppleerd gebied. Met name schelpen kunnen de stuifgevoeligheid van zand doen afnemen; in het veld hebben zich op een aantal plaatsen schelpenvloertjes ontwikkeld, waarna de verstuiwing wordt verhinderd. De condities voor het ontstaan van deze vloertjes zijn niet bekend, hoewel de resultaten van dit onderzoek er op wijzen dat ze zich vooral ontwikkelen op plaatsen die niet of zelden door de zee worden bereikt, zoals met name op duinfrontsuppleties, maar ook op banketten en op het droge strand.
- c. De hiërarchie van de invloed die andere materiaaleigenschappen op het verstuiwingsproces hebben is niet onderzocht. Voor het voorspellen van de stuifgevoeligheid van zand is het nodig de interactie te kennen tussen de factoren die bepalend zijn voor de stuifgevoeligheid.
- d. De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat het kalkgehalte een belangrijke standplaatsfactor voor de vegetatie is en een deel van de variatie in vegetatie verklaart. Er is geen onderzoek verricht naar de mate waarin zandsuppletie de toevoer van kalk naar de zeereep kan wijzigen. Het is duidelijk dat suppletiezand schelprijk kan zijn, maar in hoeverre het materiaal verstuifbaar kalk bevat, is onbekend. Naast de samenstelling van het op te brengen

suppletiezand kan ook de mate waarin het schelpmateriaal in suppletiezand door de zee en de wind tussen de kwartskorrels kan worden 'vermalen' hier een rol bij spelen. Eerder onderzoek van niet gesuppleerd zand (Eisma, 1968) wijst uit dat kalk aanwezig is in de zeer grove fracties (met de schelpfragmenten), en daarnaast ook in de fijne zandfracties. Daar juist de fijne fracties over grote afstanden kunnen worden getransporteerd, blijven eventuele effecten van een verhoogde kalktoevoer op de vegetatie waarschijnlijk niet beperkt tot de zeereep, maar kan ook de vegetatie in de ontkalkte binnenduinen worden beïnvloed.

Doelstelling

Voorgesteld wordt een nader onderzoek te verrichten met als doel de hierboven geschetste kennisleemten op te vullen. Voor de vier vraagstukken is een aantal deelvragen geformuleerd.

- a. Wat is de invloed van grootte, vorm en plaats van een zandsuppletie op de beschikbaarheid van zand? Welke effecten hebben de grootte, vorm en plaats van een zandsuppletie op het eroderend vermogen van de wind? Hoe verandert de beschikbaarheid van zand als gevolg van zandsuppletie in de tijd? Welke concrete aanbevelingen volgen hieruit voor de keuze van vorm en plaats van een toekomstige zandsuppletie?
- b. Hoe ontstaan schelpenvloertjes? In hoeveel tijd ontstaan afdekkende schelpenlagen? Wat is de invloed van de oorspronkelijke materiaaleigenschappen van het suppletiezand op het ontstaan van schelpenvloertjes? Wat is de invloed van de vorm en de plaats van een suppletie op het ontstaan van schelpenvloertjes? In welke gevallen en op welke wijze moeten schelpenvloertjes worden vermeden?
- c. Wat is de rol van de afzonderlijke materiaaleigenschappen op de aanstuiving? In hoeverre kunnen de factoren elkaars werking beïnvloeden? Kan een hiërarchisch model worden opgesteld om de stuifgevoeligheid van zand op grond van de korrelgrootte-samenstelling te voorspellen?
- d. In hoeverre verschilt de toevoer van kalk naar de zeereep tussen gesuppleerde gebieden en nabijgelegen referentiegebieden? In hoeverre wordt verstuiwing van kalk door de zandsamenstelling en de hoeveelheid en hoedanigheid van kalk in het suppletiezand bepaald?

Aanpak

- a. Een groot aantal suppletie- en referentiegebieden wordt geselecteerd op grond van onder andere variatie in vorm, plaats, ouderdom van de zandsuppletie en mogelijkheid tot referentie, waarbij met voordeel gebruik wordt gemaakt van de resultaten van dit onderzoek. De grootte, de vorm, en de plaats van suppletie en de topografie van de zeereep op de onderzoekslocaties worden geclassificeerd en/of gekwantificeerd, waarbij aandacht wordt gegeven aan onder andere de hoogte, de breedte en de afstand tot de duinvoet van de zandsuppletie. De veranderingen in de strandbreedte en vorm van de zandsuppletie worden jaarlijks gevolgd. Er wordt gebruik gemaakt van de projectgegevens en de gegevens uit het JARKUS/DONAR-bestand. Uit de literatuur volgt de invloed van beheersmaatregelen anders dan zandsuppletie (bijvoorbeeld de plaatsing van stuifschermen of helminplant) op de aanstuiving in de onderzoeksgebieden. Meteorologische gegevens van bij voorkeur nabij de onderzoeksgebieden gelegen weerstations worden verzameld en samengevat tot een aantal waarden van relevante variabelen (met

name windkracht en -richting) voor iedere periode tussen twee opnamen van het JARKUS-profiel.

In het veld worden enkele aanvullende monsters genomen en er worden beschrijvingen gemaakt van het oppervlak, waaronder een schatting van de ruwheid (zie hieronder). De monsters worden in het laboratorium onderzocht op met name korrelgrootte-verdeling, gehalte aan klei, schelp(fragment)en zout.

De aanstuiving wordt bepaald, bijvoorbeeld met behulp van het JARKUS/DONAR-bestand en het bepalen van de afstand tussen helmknopen en zo mogelijk ook met behulp van andere technieken.

De invloed van de vorm, plaats, grootte en materiaaleigenschappen van de zandsuppletie en meteorologische omstandigheden op de aanstuiving wordt door middel van bijvoorbeeld Principal Component Analysis gekwantificeerd.

Een deel van de verzamelde gegevens (hoogteprofiel, oppervlakteruwheid en windgegevens) is benodigd als invoer voor een tweetal simulatiemodellen dat wordt ontwikkeld op het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium. Met behulp van het programma DUNEFLOW (Van Boxel) worden de veranderingen in het windveld ten gevolge van de morfologie berekend, waarna met het model SAFE (Arens en Van Dijk) het verloop van eolisch zandtransport kan worden gesimuleerd. Op deze wijze kan de interactie tussen de vorm, plaats en grootte van de suppletie en de instuiving in de zeereep inzichtelijk worden gemaakt.

- b. Tijdens korte veldbezoeken aan de suppletiegebieden en referentiegebieden wordt het voorkomen van schelpenvloertjes in relatie tot hoogteligging en overschrijdingskansen voor hoog water, de tijd na het opbrengen van een zandsuppletie, de dikte van de vloertjes en het aantal schelpenbanken in een suppletie (dat te zien is in het afslagklif van de zandsuppletie of in een boring) geïnventariseerd. Monsters van onbewerkt suppletiezand en oppervlaktemateriaal worden in het laboratorium op schelpgehalte geanalyseerd.
De invloed van schelpen op het verstuiwingsproces wordt gekwantificeerd door in de windtunnel (gemengd) zand met een verschillend initieel schelpgehalte met schelpfragmenten van variërende grootte aan de wind bloot te stellen. Naast windtunnelproeven die in dit rapport zijn beschreven, worden ook proeven met andere windsnelheden uitgevoerd, om na te gaan in welke gevallen de schelpenvloertjes door de wind kunnen worden omgewerkt. Ook kan het effect van simpele ingrepen, bijvoorbeeld het verstoren van het schelpendek, worden nagegaan.
- c. Verschillende zandmengsels (verkregen door middel van het weer mengen van gezeefd materiaal) waarvan de korrelgrootte-samenstelling bekend is, worden in de windtunnel getoetst op stuifgevoeligheid. Ook wordt de kritische windsnelheid bepaald. Gestreefd wordt naar een proef waarvoor in tegenstelling tot de in dit rapport beschreven proeven weinig zand benodigd is. Om het effect van een factor duidelijk te maken, moeten de andere factoren constant zijn. Het effect van de volgende factoren op de stuifgevoeligheid moet worden onderzocht: initieel schelpgehalte, kleigehalte, mate van compactie en sortering, mediaan en zo mogelijk andere factoren, zoals mineralogische samenstelling en cohesie tussen de deeltjes door ijzer, vrij (fijn) kalk en zout, en daarnaast verschillende initiële vochtgehalten. De onder a. en b. geformuleerde vraagstellingen kunnen met deze resultaten nader worden onderbouwd. Om de interactie tussen de factoren te kwantificeren, worden verschillende combinaties van eigenschappen van zand met een bekende samenstelling in de windtunnel op stuifgevoeligheid getoetst. In een hiërarchisch model wordt aangegeven welke factoren het belangrijkste zijn en wordt duidelijk hoe de factoren elkaars werking beïnvloeden. Voor de validatie van het model kan onder andere gebruik worden gemaakt van de analyses

van voor dit onderzoek bemonsterde zand en de gegevens van zand uit de winlokatie.

- d. Voor het onderhavig onderzoek zijn monsters genomen van onbewerkt en verstoven suppletiezand en van zand van strand en zeereep in referentiegebieden. Deze en zo nodig een aantal aanvullende monsters worden op kalkgehalte en korrelgrootte-verdeling onderzocht. Het verdient aanbeveling om niet alleen het totale kalkgehalte, maar het kalkgehalte ook per fractie te bepalen. Vergelijking van de resultaten geeft inzicht in de effecten van zandsuppletie op het kalkgehalte.

Verschillende zandmengsels, waarvan het kalkgehalte en de korrelgrootte-verdeling bekend is, worden in de wintunnel op stuifgevoeligheid getoetst. Van het materiaal wordt ook de kritische windsnelheid bepaald. Aan het eind van de windtunnel wordt een zandvanger geplaatst, die het verstoven zand invangt. Dit zand wordt vervolgens in het laboratorium op kalkgehalte en korrelgrootte-verdeling geanalyseerd.

Beoogde resultaten

Het aandeel van de afzonderlijke factoren die als gevolg van zandsuppletie wijzigen, wordt inzichtelijk gemaakt en gekwantificeerd. Dit leidt tot concrete aanbevelingen voor de keuze van suppletiezand, de keuze van vorm en plaats van de zandsuppletie in het dwarsprofiel en de wijze van opbrengen van de zandsuppletie en eventuele simpele ingrepen achteraf waarmee eventuele negatieve effecten op de zeereep- en vegetatieontwikkeling kunnen worden geminimaliseerd en de uitvoer van zandsuppletie kan worden geoptimaliseerd.

5.2 Relatie samenstelling suppletiezand en vegetatie-ontwikkeling

Probleemstelling

Uit het haalbaarheidsonderzoek naar ecologische effecten van zandsuppleties bleek, dat de literatuur geen informatie bevat over de gevolgen van het gebruik van suppletiezand met afwijkende abiotische karakteristieken (met name het kalkgehalte en de korrelgrootteverdeling) voor de vegetatie-ontwikkeling (helmvitaliteit en soortensamenstelling). Uit correlatief onderzoek (zie onder meer hoofdstuk 3) blijkt het kalkgehalte een belangrijke invloed te hebben op de vegetatiesamenstelling. Het is niet bekend of en zo ja hoe de helmvitaliteit door het kalkgehalte wordt beïnvloed. Het is evenmin bekend of op langere termijn effecten te verwachten zijn van een minder goede sortering van het ingestoven suppletiezand (als gevolg van een heterogenere korrelgrootteverdeling) op de helmvitaliteit en de soortensamenstelling.

Doelstelling

Nagaan in hoeverre het gebruik van "vreemd" suppletiezand, dat qua kalkgehalte en korrelgrootte-verdeling afwijkt van het ter plaatse van nature ingestoven strandzand, een effect kan hebben op de helmvitaliteit en de soortensamenstelling.

Aanpak

- Door middel van groeiproeven met monocultures en mengsels van helm en de meest karakteristieke begeleidende zeereepsoorten op verstoven strand- en suppletiezand (van verschillende herkomsten en door menging verkregen zandmonsters) wordt nagegaan in

hoeverre de groei onder optimale en stress-omstandigheden wordt beïnvloed door het kalkgehalte en de korrelgrootteverdeling.

- Door middel van overstuiving in het veld met de hiervoor beschreven zandmonsters worden de in de kas verkregen resultaten ten aanzien van de meest extreme behandelingen onder veldomstandigheden geverifieerd.

Beoogde resultaten

Nagegaan wordt welke (mate van) afwijking van de zandeigenschappen van het suppletiezand ten opzichte van het ter plaatse aanwezige strandzand mogelijk zijn zonder grote ecologische veranderingen voor de zeereepflora te introduceren.

LITERATUUR

- Adriani, M.J. en J.H.J. Terwindt (1974). Sand stabilization and dune building. Rijkswaterstaat Communications nr. 19, Staatsuitgeverij, Den Haag, 68 pp.
- Arens, S.M. (1994). Aeolian processes in the Dutch foredunes. Proefschrift. Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam, 150 pp.
- Bagnold, R.A. (1960). The physics of blown sand and desert dunes. Methuen en co., London, 2e druk, 266 pp.
- Bakker, J.P. (1976). Phytogeographical aspects of the vegetation of the outer dunes in the Atlantic province of Europe. J. Biogeography 2, pp. 85-104.
- Barbour, M.G., T.M. DeJong en A.F. Johnson (1976). Synecology of beach vegetation along the Pacific Coast of the United States of America: a first approximation. J. Biogeogr. 3, pp. 55-69.
- Barbour, M.G., T.M. DeJong en B.M. Pavlik (1985). Marine beach and dune plant communities. pp. 296-322. In: B.F. Chabot en H.A. Mooney (red.). Physiological ecology of North American plant communities. Chapman and Hall, New York, 351 pp.
- Beemster, J.G.R. (1986). De relatie tussen vorm en gedrag van zandkorrels in eolische processen. Een literatuurstudie. Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam, 40 pp.
- Belly, P.Y. (1964). Sand movement by wind. Technical memorandum 1, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Washington D.C., 38 pp. + bijlagen.
- Bemmelen, C.E. van (1988). De korrelgroottesamenstelling van het strandzand langs de Nederlandse Noordzeekust. Dienst Getijdewateren, Rijkswaterstaat en Vakgroep Fysische Geografie, Rijksuniversiteit Utrecht, 38 pp. + bijlagen.
- Boyd, R.S. (1992). Influence of *Ammophila arenaria* on foredune plant microdistributions at Point Reyes National Seashore, California. Madroño 39, pp. 67-76.
- Carter, R.W.G. (1976). Formation, maintenance and geomorphological significance of an aeolian shell pavement. Journal of sedimentary petrology, vol. 46, nr. 2, pp. 418-429.
- Carter, R.W.G. en C.L. Rihan (1978). Shell and pebble pavements on beaches: examples from the North coast of Ireland. Catena 5, pp. 365-374.
- CBS (1993). Botanisch Basisregister. Centraal bureau voor de Statistiek.
- Chepil, W.S. (1945). Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. Soil science, vol. 60, nr. 3, pp. 305-320.
- Dekker, L.W. and Jungerius, P.D. 1990 Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. Catena suppl. 18: 173-183.
- Depuydt, F. (1972). De Belgische strand- en duinformaties in het kader van de geomorfologie der zuidoostelijke Noordzeekust. Verhandelingen van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen, Paleis der Academiën, vol. 34, nr. 22, Brussel, 227 pp. + bijlagen.
- Derksen, I., M.A.M. Löffler en E.H. Kloosterman (1994). De ontwikkeling van een operationeel helmonitoringsysteem voor kustverdedigingsdoeleinden. deel II Implementatie. BCRS, Beleidscommissie Remote Sensing. BCRS rapport 94-04A, 43 pp. + bijlagen.
- Dierren, J.W. van (1934). Organogene Dünenbildung: eine geomorphologische Analyse der Dünenlandschaft der West-Friesische Insel Terschelling mit pflanzensoziologischen Methoden. Martinus Nijhoff, Den Haag, 304 pp.
- Draga, M. (1983). Eolian activity as a consequence of beach nourishment - observations at Westerland (Sylt), German North Sea coast, Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd. 45, pp. 303-319.
- Eisma, D. (1968). Composition, origin and distribution of Dutch coastal sands between Hoek van Holland and the island of Vlieland. Proefschrift. Rijksuniversiteit Groningen, Brill, Leiden, 267 pp.
- Fay, M.B. (1989). GAPP. Grain Size Analysis Program Package. University of Dar es Salaam,

- Department of Geology, Dar es Salaam, Tanzania.
- Goes, P.C.E.M. van der (1992a). Schadelijke bodemorganismen in helmduinen; Wetenschappelijk eindrapport. Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Heteren
- Goes, P.C.E.M. van der (1992b). Schadelijke bodemorganismen in helmduinen; Samenvattend eindrapport. Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Heteren.
- Hillen, R., J.H.M. de Ruig, P. Roelse en F.P. Hallie (1991). De basis kustlijn, een technisch/morfologische uitwerking. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren. Nota GWWS-91.006, 39 pp. + bijlagen.
- Horikawa, K., S. Hotta en C. Kraus (1986). Literature review of sand transport by wind on a dry sand surface. Coastal engineering 9, pp. 503-526.
- Jungerius, P.D., A.J.T. Verheggen en A.J. Wiggers (1981). The development of blowouts in 'De Blink'. A coastal dune area near Noordwijkerhout, The Netherlands. Earth surface processes and land forms, vol. 6, pp. 375-396.
- Kant, G. (1992). Verliezen tijdens zandsuppleties. Doctoraal-verslag, Vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit, Delft, 81 pp.
- King, C.A.M. (1972). Beaches and coasts. Arnold, London, 2e druk, 570 pp.
- Knottnerus, D.J.C. (1985). Verstuiven van gronden. Beschouwingen over te nemen maatregelen, rapportering van gedaan onderzoek. Nota 144, Interne mededeling, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, 57 pp.
- Kohsiek, L.H.M. (1984). De korrelgroottekenmerken van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust. Nota WWKZ-84 G.007. District Kust en Zee, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Rijkswaterstaat, 38 pp. + bijlagen.
- Kroon, A. en P. Hoekstra (1990). Eolian sediment transport on a natural beach. Journal of Coastal Research, vol. 6, nr. 2, pp. 367-379.
- Maun, M.A. (1994). Adaptations enhancing survival and establishment of seedlings on coastal dune systems. Vegetatio 111, pp. 59-70.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1988). Handboek zandsuppleties. Waltman, Den Haag, 310 pp.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1990). Kustverdediging na 1990. Beleidskeuze voor de kustlijnverzorging. Tweede Kamer, 1989-1990, 21, 136, nrs. 5 en 6, SDU, Den Haag, 66 pp.
- Nickling, W.G. (1984). The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind. Sedimentology 31, pp. 111-117.
- Nickling, W.G. (1988). The initiation of particle movement by wind. Sedimentology 35, pp. 499-511.
- Nickling, W.G. en M. Ecclestone (1981). The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand. Sedimentology 28, pp. 505-510.
- Nickling, W.G. en R.G.D. Davidson-Arnott (1990). Aeolian sediment transport on beaches and coastal dunes. In: R.G.D. Davidson-Arnott (red.). Proceedings of the symposium on coastal sand dunes, National Research Council, Ottawa, pp. 1-35.
- Nordstrom, K.F. en N.L. Jackson (1993). The role of wind direction in eolian transport on a narrow sandy beach. Earth surface processes and landforms, vol. 18, pp. 675-685.
- Olij, E. (1993). Zandsuppleties. Karakterisering en stuifgevoeligheid van suppletiezand van een aantal suppleties langs de Nederlandse kust. Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam, 60 pp. + bijlagen.
- Oremus, P.A.I. en H. Otten (1981). Factors affecting growth and nodulation of *Hippophae rhamnoides* (L.) ssp. *rhamnoides* in soils from two successional stages of dune formation. Plant and Soil 63, pp. 317-331.
- Payne, A.M. (1980). The ecology and population dynamics of *Cakile edentula* var *lacustris* on Lake Huron beaches. M.Sc. thesis. University of Western Ontario, London, Ontario, 193 pp.
- Pluis, J.L.A. (1993). The role of algae in the spontaneous stabilization of blowouts. Academisch

- proefschrift. Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam, 168 pp.
- Putten, W.H. van der (1989). Establishment, growth and degeneration of *Ammophila arenaria* in coastal sand dunes. Ph.D. thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Putten, W.H. van der, en B.A.M. Peters (1993). Beheer van helmbegroeiing en stimulering van successie in zeewerende duinen. Rapport Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Heteren.
- Putten, W.H. van der, C. van Dijk en B.A.M. Peters, (1993). Plant-specific soil-borne diseases contribute to succession in foredune vegetation. *Nature* 362, pp. 53-55.
- Reineck, H.E. en I.B. Singh (1980). Depositional sedimentary environments. Springer, Berlin, 2e druk, 556 pp.
- Rijks Geologische Dienst (1992). Geologisch onderzoek in de blokken L17, Q2 en Q5 ten behoeve van zandsuppleties. Uitgebracht bij briefnummer CL92638 aan Directie Noord-Holland, Rijkswaterstaat, Haarlem.
- Rijks Geologische Dienst (1993a). Geologisch onderzoek potentieel zeezandwingebied ten behoeve van suppletie Rijnland (blok Q13). Uitgebracht bij briefnummer CL935443 aan Directie Noordzee, Rijkswaterstaat.
- Rijks Geologische Dienst (1993b). Onderzoek zeezandwingebied locatie Texel. Uitgebracht bij briefnummer CL931021 aan Directie Noordzee, Rijkswaterstaat.
- Rijks Geologische Dienst (1994a). Aanvullend onderzoek zandwingebied blok Q13. Rapport OP 6529. Uitgebracht bij briefnummer CL941423 aan Directie Zuid-Holland, Rijkswaterstaat.
- Rijks Geologische Dienst (1994b). Sedimentologisch onderzoek kustgebied Rijnland. Rapport OP 6529. Uitgebracht bij briefnummer CL94808 aan Directie Zuid-Holland, Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat, Directie Friesland, Dienstkring Waddeneilanden (1990). Noordzeekust. Zandsuppletie raai 12.40-16.00. Bestek F-2116, dienst 1990 + Tekening.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (1986). Zandwingebied Schulpengat ten behoeve van zandsuppletie bij het Zwanenwater. Tekening 3.41.NKU-86-120A.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (1987a). Boringen in zandwingebied Schulpengat ten behoeve van zandsuppletie Zwanenwater.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (1987b). Analyse zand strandsuppletie Zwanenwater. Bestekcontrole NH4283. Van P.J.J. van der Meulen aan B.J. Budde, Haarlem, 21 pp.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (1992). Zeefanalyse zand NHK.60056. Bestekcontrole suppletie Camperduin-Egmond.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Dienstkring Texel (1994a). Suppletie tussen raai 25.50 en 29.60 volgens besteknummer NHC-20070, dienst 1994-1995. Nota van inlichtingen.
- Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Dienstkring Texel (1994b). Suppletie tussen raai 25.50 en 29.60 volgens besteknummer NHC-20070, dienst 1994-1995. Tweede nota van inlichtingen.
- Rijkswaterstaat, Directie Noordzee (1978). Detailblad. Boringen Schulpengat Q2-66-003 tot en met 011. Tekening 78-262 + Boorbeschrijvingen.
- Rijkswaterstaat, Directie Noordzee (1990). Zandwinning locatie Texel. Bodemgesteldheid. Tekening NZMT 1990-211.
- Rijkswaterstaat, Directie Zeeland (1986). Resultaten boringen zandwininput Kop Schouwen. Van D. van Dam (NXL) aan leden KUBES + bijlagen, Tekening NXT 862084 en Boorbeschrijvingen.
- Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Dienstkring Deltakust (1991). Zeewering Schouwen-Duiveland, zandsuppletie Kop van Schouwen. Situatie zandwingebied en situatie algemeen. Tekening ZLDK-1991-5017 bestek ZL-3245.
- Roelse, P. en R. Hillen (1993). Evaluatie zandsuppleties. Een morfologische beschouwing. Interim rapportage. Rapport DGW-93054, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rijkswaterstaat, Den Haag, 86 pp. + bijlagen.

- Rooij-Van der Goes, P.C.E.M. de, en P.D. Jungerius (1994). Verbetering van de vitaliteit van gedegenerende helmbegroeiing door gecontroleerde verstuiwing in de zeereep. Rapport W-DWW-94.713/TAWCC94.002. Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek in samenwerking met Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Universiteit van Amsterdam, in opdracht van Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat en de Kustbeherende Waterschappen, Heteren, 76 pp.
- Sarre, R.D. (1989). The morphological significance of vegetation and relief on coastal foredune processes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. Suppl. Bd. 73, pp. 17-31.
- Sherman, D.J. en S. Hotta (1990). Aeolian sediment transport: theory and measurement. In: K.F. Nordstrom, N.P. Psuty en R.W.G. Carter (red.). *Coastal dunes: form and process*. Wiley, Chichester, England, pp. 17-37.
- Sherman, D.J. en B.O. Bauer (1993). Dynamics of beach-dune systems. *Progress in physical geography*, pp. 413-417.
- Smalley, I.J. (1970). Cohesion of soil particles and the intrinsic resistance of simple soil systems to wind erosion. *Journal of soil science*, vol. 21, nr. 1, pp. 154-161.
- Stolk, A. (1989). Zandsysteem kust. Een morfologische karakterisering. Technisch Rapport 1. Kustverdediging na 1990, Rijkswaterstaat. Rapport GEOPRO 1989.02, Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, 98 pp.
- Svasek, J.N. en J.H.J. Terwindt (1974). Measurements of sand transport by wind on a natural beach. *Sedimentology* 21, pp. 311-322.
- Sykes, M.T. en J.B. Wilson (1988). An experimental investigation into the response of some New Zealand sand dune species tot salt spray. *Annals of botany* 62, pp. 159-166.
- Sykes, M.T. en J.B. Wilson (1989). The effect of salinity on some sand dune species. *Acta Bot. Neerl.* 38, pp. 173-182.
- Sykes, M.T. en J.B. Wilson (1990). An experimental investigation into the response of New Zealand sand dune species tot different depths of burial by sand. *Acta Bot. Neerl.* 39, pp. 171-181.
- Till, R. (1985). *Statistical methods for the earth scientist. An introduction*. Maxmillan, 154 pp.
- Verveen, W. (1992). Competitie tussen helm (*Ammophila arenaria*) en duinzwenkgras (*Festuca rubra* ssp. *arenaria*) onder invloed van plantspecifieke bodempathogenen, nutriënten, vocht en zoutspray. Stageverslag Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Heteren.
- Veugen, L.M.N. (1984). De nauwkeurigheid van strandprofielen, fotogrammetrische data-acquisitie. Rapport MDLK-R-8403. Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, Delft, 20 pp. + bijlagen.
- Voogt, H. (1988). Verzwaring van de zeereep en problemen met helmbeplanting. *Waterschapsbe-
langen*, pp. 208-213.
- Westhoff, V. en M.F. van Oosten (1991). De plantengroei van de Waddeneilanden. Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, Utrecht, pp. 12-20.
- Willetts, B.B. (1983). Transport by wind of granular materials of different grain shapes and densities. *Sedimentology* 30, pp. 669-679.
- Willetts, B.B., M.A. Rice en S.E. Swaine (1982). Shape effects in aeolian grain transport. *Sedimentology* 29, pp. 409-417.
- Williams, G. (1964). Some aspects of the eolian saltation load. *Sedimentology* 4, pp. 257-287.
- Wong, H. (1993). De rol van bodempathogenen op de degeneratie van *Carex arenaria* en de invloed van plantspecifieke bodempathogenen op de competitie tussen *Ammophila arenaria* en *Festuca rubra* ssp. *arenaria*. Stageverslag Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek, Heteren.
- Wallèn, B. (1980). Changes in structure and function of *Ammophila* during a primary succession. *Oikos* 34, pp. 227-238.
- Zoon, F.C. (1986). On the relative involvement of nematodes and other soil factors in the decline of *Hippophaë rhamnoides* L. in the Netherlands. *Revue. Nematol.* 9, p. 314.

BIJLAGE 1. LIJST VAN SYMBOLEN

- **RGD**
Afdeling Mariene Geologie, Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- **RWS**
Diverse directies en diensten van Rijkswaterstaat (zie literatuurlijst)
- **Mm**
Mediaan van de zandfractie (63 - 2000 μm) (d.i. 50% van het gewicht is fijner), bepaald met behulp van een vergelijkmicroscop, uitgedrukt in μm .
- **d_{50}**
Korrelgrootte in μm , waarbij 50% van de totale gewichtsfractie van het monster fijner is. De mediaan d_{50} is bepaald met behulp van zeven, waarbij schelpfragmenten, humus en ijzer vooraf niet zijn verwijderd.
- **d_{50m}**
Als d_{50} , maar bepaald met behulp van een vergelijkmicroscop.
- **d_{50z}**
Als d_{50} , maar bepaald door middel van zeven, waarbij kalk, humus, en ijzer niet vooraf zijn verwijderd, tenzij in de tekst anders is vermeld.
- **d_{50l}**
Als d_{50} , maar bepaald met behulp van een laser counter.
- **K**
Bereik van de korrelgrootte-verdeling in een boorprofiel in μm .
- **S_{RGD}**
Per boorprofiel gewogen gemiddelde van de door de Rijks Geologische Dienst bepaalde spreidingsmaat S, hier genoemd S_{RGD} . S_{RGD} is de grootte van het maximale gewichtsperscentage materiaal van drie aangrenzende 0.5 phi-zeeffracties, met $S_{RGD} < 60\%$: grote spreiding, $60\% < S_{RGD} < 70\%$: matige spreiding en $S_{RGD} > 70\%$: kleine spreiding.
- **$S = d_{90}/d_{10}$**
Uit zeefkrommen bepaalde verhouding tussen d_{90} en d_{10} , die de sortering aangeeft, met d_{90} is de korrelgrootte in μm , waarbij 90% van de gewichtsfractie van het materiaal fijner is en d_{10} is de korrelgrootte in μm , waarbij 10% van de gewichtsfractie van het materiaal fijner is. d_{90}/d_{10} geeft de helling van de zeefkromme weer.
- **U**
Uit zeefkromme bepaalde verhouding tussen d_{60} en d_{10} , met d_{60} is de korrelgrootte in μm , waarbij 60% van de gewichtsfractie van het materiaal fijner is en d_{10} is de korrelgrootte in μm , waarbij 10% van de gewichtsfractie van het materiaal fijner is. Bij het zeven zijn kalk, humus en ijzer vooraf niet verwijderd.
- **Uz**
Als U, maar kalk, humus en ijzer kunnen voorafgaand aan het zeven verwijderd zijn.
- **Ul**
Als U, maar bepaald uit korrelgrootte-verdeling van analyses met behulp van de laser

counter.

- σ
Standaarddeviatie van de korrelgrootte-verdeling in phi-eenheden.
- $< 75 \mu\text{m}$
Gewichtsfractie deeltjes fijner dan $75 \mu\text{m}$ in % van het totaalgewicht van een onbehandeld (alleen gedroogd) monster.
- $600-2000 \mu\text{m}$
Gewichtsfractie $600-2000 \mu\text{m}$ in % van het totaalgewicht van een onbehandeld (alleen gedroogd) monster.
- $> 2000 \mu\text{m}$
Gewichtsfractie groter dan $2000 \mu\text{m}$ in % van het totaalgewicht van een onbehandeld (alleen gedroogd) monster.
- klei
Hoeveelheid en hoedanigheid van klei (minerale delen $< 2 \mu\text{m}$). Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig slib(laagjes), kleibanden, -brokken of insluitsels (-) en boorprofielen met tenminste één laag matig tot zeer slib- of kleihoudende zand (ook in brokken, banden of insluitsels) of klei (+).
- silt
Hoeveelheid en hoedanigheid van silt (minerale delen $> 2 \mu\text{m}$ en $< 63 \mu\text{m}$). Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig silt- of slibinclusies, silt- of slibhoudend zand of silt- of sliblaagjes (-) en boorprofielen met tenminste één laag matig tot zeer silt- of slibhoudende zand of silt- of slibinsluitsels (+).
- grind
Hoeveelheid grind en stenen (minerale delen $> 2000 \mu\text{m}$). Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder grind en stenen (-) en boorprofielen met tenminste één laag (zand) met grind en/of stenen (+).
- schelp
Hoeveelheid en hoedanigheid van schelpen. Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder schelp(fragment)en of met een spoor schelpgruis of enkele of weinig schelp(fragment)en (-) en boorprofielen met tenminste één laag met matig veel, tamelijk veel, veel, rijk en zeer rijk aan schelp(fragment)en (+).
- org
Hoeveelheid en hoedanigheid van organische stof. Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen zonder of met (zeer) weinig organisch materiaal (humus, veen, houtresten, detritus) (-) en boorprofielen met tenminste één laag met matig veel tot zeer veel organisch materiaal (+).
- kalk
Hoeveelheid kalk. Er is onderscheid gemaakt tussen boorprofielen die gemiddeld kalkvrij zijn of een spoor of weinig kalk bevatten (-) en boorprofielen die gemiddeld matig of sterk kalkhoudend zijn (+).
- Boring vlak naast het wingebied

BIJLAGE 2. GEGEVENS VAN DE WINLOKATIES

boring RGD	Mm	d50m	K	S _{zoo}	klei	silt	grind	org	schelp	kalk
90AS354A	267	267	105-420	65	-	-	-	-	+	+
90AS355*	170	202	105-300	70	-	-	-	-	-	+

a. Ameland, gegevens winlokatie (tot twee meter beneden de zeebodem) voor de suppleties in 1990 en 1992, zie ook Bijlage 1.

boring RGD	Mm	d50z	K	S _{zoo}	klei	silt	grind	org	schelp	kalk
90AS243	310	315	210-420	> 70	-	-	-	-	-	+
90AS244	360	298	210-420	> 70	-	-	-	-	-	+
90AS245	360	348	210-420	> 70	-	-	-	-	-	+
90AS247	310	185	210-420	> 70	+	+	+	-	-	+
90AS248	320	333	210-420	> 70	-	-	+	-	-	+
90AS249	269	618	210-420	> 70	-	-	+	-	-	±

b. Texel: Eierland, gegevens winlokatie (tot twee meter beneden de zeebodem) voor de suppletie in 1990, zie ook Bijlage 1.

boring RGD	Mm	d50m	d50z	K	S _{zoo}	Ul	klei	silt	grind	org	schelp	kalk
90AS244	360		298	210-420	> 70		-	-	-	-	-	+
90AS245	360		348	210-420	> 70		-	-	-	-	-	+
90AS246	320		350	210-420	> 70		-	-	-	-	-	+
90AS247	310		185	210-420	> 70		+	+	+	-	-	+
90AS248	320		333	210-420	> 70		-	-	+	-	-	+
92AS656		287		105-420	60	2.13	+	+	+	-	-	-
92AS657		262		63-420	65	1.57	+	+	+	-	-	-
92AS658		332		210-420	> 70	1.57	-	-	-	-	-	-
92AS659		335		210-420	> 70	1.66	-	-	-	-	-	+
92AS660		285		150-420	> 70	1.78	-	-	-	-	-	-
92AS661		332		210-420	< 60	1.86	-	-	-	-	+	+
92AS662		310		210-420	65	1.65	+	+	-	-	-	-
92AS663		255		210-300	65	2.26	+	+	+	-	-	-
92AS664		350		210-420	65	1.72	+	+	-	-	-	-
92AS665		350		210-420	65	1.74	-	-	+	-	-	-
92AS666		268		105-420	65	2.50	+	+	+	+	-	-
92AS667		181		105-420	70		+	+	+	+	+	+
92AS668		340		150-420	> 70	1.70	-	-	-	-	-	-

c. Texel: Eierland, gegevens winlokatie (tot twee meter beneden de zeebodem) voor de suppletie in 1994, zie ook Bijlage 1.

boring RWS	d50z	S _{rec}	Uz	klei	grind	org	schelp
MP2-1987	231	> 70	1.64				
MP3-1987	232	> 70	1.71				
MP4-1987	318	> 70	1.82				
MP5-1987	204	> 70	1.97				
MP6-1987	242	> 70	1.77				
MP7-1987	238	> 70	1.63				
MP8-1987	221	> 70	1.60				
66-001	250-370			+	-	+	+
66-002	370			-	-	+	+
66-003	380			-	-	-	+
66-004	240-320			-	-	-	-
66-005	320			-	-	-	+
66-006	280			-	-	-	+
66-007	260-390			-	+	-	+
66-008	240			-	-	-	+
66-009	200			-	-	-	-
66-010	260-320			-	-	-	+
66-011				+	-	+	+
66-012	200			+	-	-	-

d. Zwanenwater, gegevens winlokatie (tot ca één meter beneden de zeebodem) voor de suppletie in 1987, zie ook Bijlage 1.

Boring RGD	d50m	K	S _{rec}	klei	silt	grind	schelp	org	kalk
9ZZ846'	213	105-300	> 70	-	-	-	-	-	+
9ZZ848'	216	105-300	> 70	-	-	-	-	-	+
9ZZ850	217	150-300	> 70	-	-	-	+	-	+

e. Camperduin-Egmond, gegevens winlokatie (tot ca 2.5 meter beneden de zeebodem) voor de suppletie in 1992, zie ook Bijlage 1.

boring RGD	Min	d50m	d50z	d50l	K	S _{kon}	U1	Uz	klei	silt	grind	org	schelp	kalk
93DW529		266		344	150-420	65			+	+	-	-	-	+
93DW530		301		359	150-420	65			-	-	-	-	-	+
93DW531		262		332	150-420	65			-	-	-	-	-	+
93DW532		240		322	150-420	65			-	-	-	-	-	+
94DW60	134		252	296	105-420	60-65	2.04	1.94	-	-	-	-	-	+
94DW61	208		247	317	150-300	65	1.89	1.97	-	-	-	-	-	+
94DW62	254		292	327	105-420	65	1.96	1.91	-	-	-	-	-	+
94DW63	232		279	347	105-420	65	1.80	1.70	-	-	-	+	-	+
94DW64	169		283	355	75-600	60	1.87	1.80	-	+	+	+	+	+
94DW65	227		259	326	75-420	60-65	1.92	1.84	-	-	-	+	+	+
94DW66	234		268	352	75-300	60	2.03	2.18	-	-	+	-	+	+
94DW67	254		316	374	63-600	60-65	2.04	1.90	-	-	-	-	+	+
94DW68	223		272	325	105-600	65	2.00	1.84	-	-	+	+	-	+
94DW69	218		293	317	63-600	60-65	2.07	1.78	-	-	-	-	-	+
94DW70	311		264	389	105-1000	60-65	1.98	1.88	-	-	+	-	-	+
94DW71	249		265	367	63-420	60-65	1.80	1.80	-	-	-	-	-	+
94DW72	235		285	318	75-420	60-65	1.88	1.81	-	-	-	-	-	+
94DW73	311		286	340	63-420	60-65	1.86	1.87	-	-	-	-	-	+

f. Rijnland, Meijendel, gegevens winlokatie (tot vier meter beneden de zeebodem) voor de suppletie in 1994, zie ook Bijlage 1.

boring RGD/RWS	d50m	d50l	silt	grind	org	schelp	kalk
42D410	270	292	+	-	-	+	+
42D411	353	233	+	-	-	+	+
42D412	257	248	-	-	-	+	+
42D413	268	245	+	-	-	+	+
42B2412	290	262	+	-	-	-	+
42B2413	283	265	-	-	-	+	+

g. Kop van schouwen, gegevens winlokatie (tot tien meter beneden NAP), voor suppletie in 1987, zie ook Bijlage 1.

Lokatie	Mm	d50m	d50z	d50l	K	S _{zoo}	Uz	U1
Ameland: Midden, 1990 en 1992	219	235			105-420	65-70		
Texel: Eierland, 1990	322			389	210-420	> 70		
Texel: Eierland, 1994-1995	334	299		310	63-420	70		1.84
Noord-Holland: Zwanenwater, 1987			271			> 70	1.73	
Noord-Holland: Camperduin-Egmond, 1992		215			105-300	> 70		
Rijnland: Meijendel, 1994	233	267	276	339	63-1000	60-65	1.87	1.94
Schouwen: Kop van Schouwen, 1987		287		258				

h. Gegevens winlokaties: samenvatting

Lokatie	klei	silt	grind	org	schelp	kalk
Ameland: Midden, 1990 en 1992	-	-	-	-	±	+
Texel: Eierland, 1990	±	±	±	-	-	+
Texel: Eierland, 1994-1995	±	±	±	±	±	±
Noord-Holland: Zwanenwater, 1987	±	±	±	±	±	+
Noord-Holland: Camperduin-Egmond, 1992	-	-	-	-	±	+
Rijnland: Meijendel, 1994	±	±	±	±	±	+
Schouwen: Kop van Schouwen, 1987	±	±	-	-	±	+

i. Gegevens winlokaties: samenvatting, vervolg

BIJLAGE 3. KORRELGROOTTE-ANALYSE

Lokatie	d50	d60/ d10	d90/ d10	σ	<75 μ m	<105 μ m	600- 2000 μ m	>2000 μ m	Grootte	Sortering	Scheef- heid	Kurtosis
Ameland: Ameland-Midden												
RSP 8.400 Strand - Ref	211	1.44	1.77	0.29	0.02	0.12	0.07	0.04	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
RSP 12.200 Zeez. - Sup 92	217	1.88	>14	1.05	0.29	1.16	3.61	18.78	middel	redelijk	grove staart	platy
RSP 15.000 Zeez. - Sup 90	227	1.70	>13	1.00	0.13	0.64	1.43	19.23	middel	redelijk	grove staart	platy
RSP 15.000 Top - Sup 90	213	1.51	1.93	0.44	0.06	0.53	0.55	0.57	fijn	goed	grove staart	lepto
Texel: Eierland												
RSP 26.600 Nat strand - Sup 90-94	283	1.52	2.05	0.52	0	0.01	4.67	1.32	middel	redelijk goed	grove staart	lepto
RSP 26.600 Droog strand - Sup 90-94	346	1.93	>9	0.93	0	0.06	2.19	32.08	middel	redelijk	grove staart	platy
RSP 26.600 Top - Sup 90-94	272	1.41	1.88	0.35	0	0.01	0.02	0.01	middel	zeer goed	zeer klein	lepto
RSP 27.400 Droog strand - Sup 94	276	1.40	1.91	0.40	0.02	0.08	1.04	0.13	middel	goed	zeer klein	lepto
Noord-Holland: Camperduin-Egmond												
RSP 30.250 Strand - Ref	256	1.31	1.73	0.29	0.04	0.09	0	0	middel	zeer goed	fijne staart	lepto
RSP 32.400 Banket 92	242	1.40	1.59	0.23	0.05	0.10	0.06	0.07	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
Rijnland: Meijendel												
RSP 93.500 Strand - Ref	338	1.63	2.26	0.45	0.01	0.02	3.28	0.04	middel	goed	zeer klein	lepto
RSP 93.500 Top - Ref	249	1.62	2.27	0.41	0.09	0.09	0.25	0	fijn	goed	zeer klein	meso
RSP 92.25 Droog strand - Sup 94	232	1.58	2.25	0.52	0.01	0.21	0.08	2.47	fijn	redelijk goed	grove staart	lepto
Schouwen: Kop van Schouwen												
RSP 10.441 Strand - Ref	242	1.51	1.88	0.32	0.02	0.11	0.04	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
RSP 13.545 Klif - Ref	210	1.47	1.86	0.36	0	0.11	0.09	0.03	fijn	goed	zeer klein	lepto
RSP 13.545 Sup 91	227	1.85	3.15	0.68	0.86	2.89	2.52	6.73	fijn	redelijk goed	grove staart	lepto

Korrelgrootte-analyse van de voor de windtunnelexperimenten onderzochte lokaties.

BIJLAGE 4. KORRELGROOTTE-ANALYSE, KOP VAN SCHOUWEN

Lokatie/ Monsternr	d50	d60/ d10	d90/ d10	< 105µm	600- 2000µm	> 2000 µm	Grootte	Sortering	Scheefheid	Kurtosis
Nat strand										
13.083- /801	244	1.56	2.1	0.35	1.08	0.06	fijn	goed	zeer klein	lepto
13.545- /813	238	1.56	1.91	0.21	2.25	0.58	fijn	goed	grote staart	lepto
Droog strand										
13.083- /802	238	1.48	1.71	0.04	0.02	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
13.345- /808	224	1.48	1.76	0.07	0.01	0.01	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
13.545- /814	234	1.52	1.77	0.24	0.22	0.1	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
Maritieme erosie op de zandsuppletie										
13.083/ 803	221	2.17	> 18	8.19	2.22	12.64	fijn	redelijk	grote staart	meso
Schelpenvoer op de zandsuppletie										
13.083/ 805	262	1.79	> 12	0.02	2.93	24.70	middel	redelijk	zeer klein	platy
13.345/ 810	238	1.73	> 13	1.34	3.66	13.16	middel	redelijk goed	grote staart	platy
13.545/ 815	227	1.85	3.15	2.89	2.52	6.73	fijn	redelijk goed	grote staart	lepto
Accumulatie op de zandsuppletie										
13.083/ 804	208	1.94	2.45	0.07	0.4	0.65	fijn	redelijk goed	fijne staart	lepto
13.345/ 809	219	1.54	1.88	0.91	0.08	0.01	fijn	goed	fijne staart	lepto
13.345/ 811	190	1.59	2.13	1.62	0.03	0	fijn	goed	fijne staart	lepto
13.545/ 816	219	1.61	1.97	1.64	0.13	0.04	fijn	goed	fijne staart	lepto
Top of klif van de oude zeereep										
13.083/ 806	315	2.06	2.47	0.69	0.53	0.3	middel	redelijk goed	fijne staart	meso
13.545/ 817	210	1.46	1.86	0.11	0.09	0.03	fijn	goed	zeer klein	lepto
Binnenduinen										
13.083/ 807	206	1.48	1.9	1.45	0.11	0.11	fijn	goed	fijne staart	lepto
13.345/ 812	217	1.67	2.06	1.87	0.37	0.25	fijn	goed	fijne staart	lepto
13.545/ 818	204	1.6	2.03	1.44	0.14	0.20	fijn	goed	zeer klein	lepto

a. Korrelgrootte-analyse van het suppletie-gebied op Schouwen

Lokatie/ Monsternr	d50	d60/ d10	d90/ d10	< 105 μm	600- 2000- μm	> 2000 μm	Grootte	Sortering	Schoefheid	Kurtosis
Nat strand										
10.44 1/706	287	1.97	> 3	0.03	35.0	0.06	middel	redelijk goed	zeer klein	platy
Droog strand										
10.24 1/701	246	1.49	1.87	0.05	0.06	0.01	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
10.44 1/707	242	1.51	1.88	0.11	0.04	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
10.84 1/712	236	1.51	1.79	0.02	0.02	0	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
Accumulatie achter stuifschermen en natuurlijke accumulatie										
10.24 1/702	240	1.48	1.7	0.16	0	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
10.44 1/708	237	1.5	1.75	0.06	0.04	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
10.44 1/709	242	1.55	2.06	0.09	0.02	0	fijn	goed	zeer klein	lepto
10.84 1/713	232	1.53	1.82	0.11	0	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
10.84 1/714	232	1.52	1.80	0.11	0.01	0	fijn	zeer goed	fijne staart	lepto
Zeeroepkruin										
10.24 0/703	233	1.52	1.79	0.03	0.03	0.03	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
10.44 1/710	204	1.43	1.81	0.1	0.19	0.11	fijn	zeer goed	grote staart	lepto
10.84 1/715	204	1.43	1.81	0.06	0.02	0.01	fijn	zeer goed	zeer klein	lepto
Binnenduinen										
10.24 1/704	241	1.53	2.02	0.1	1.34	2.03	fijn	goed	grote staart	lepto
10.24 1/705	206	1.46	1.93	0.46	1.48	1.48	fijn	goed	grote staart	lepto
10.44 1/711	216	1.48	1.84	0.2	0.82	0.2	fijn	goed	grote staart	lepto
10.84 1/716	216	1.49	1.87	0.07	0.26	0.14	fijn	goed	grote staart	lepto

b. Korrelgrootte-analyse van het referentie-gebied op Schouwen

BIJLAGE 5. WINDTUNNELPROEVEN

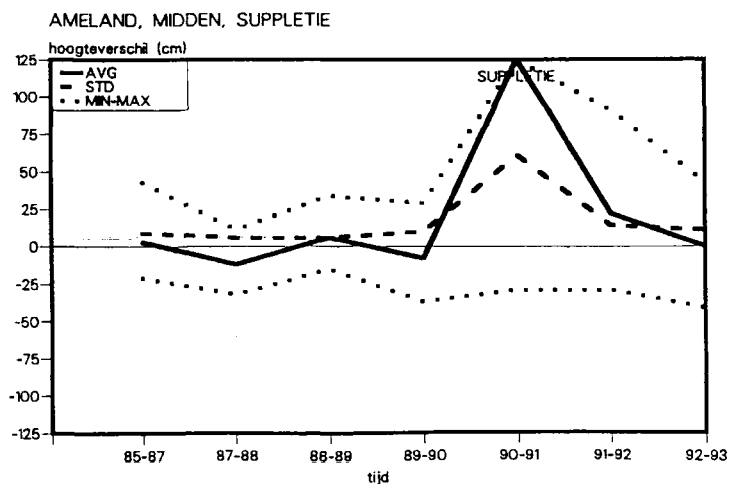
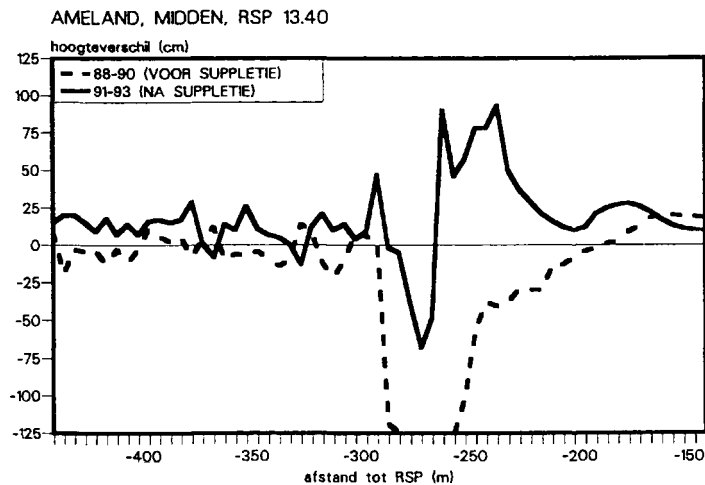
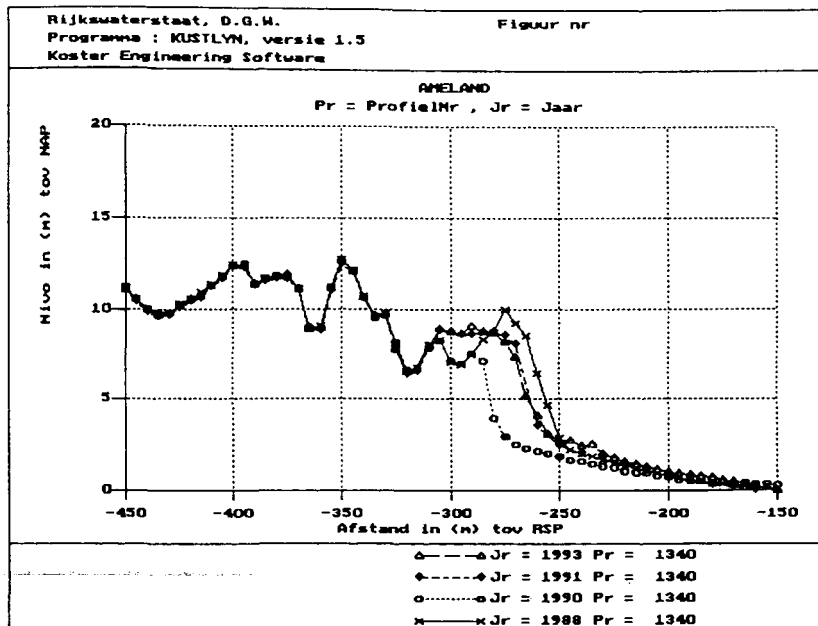
Lokatie	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Gem.
Ameland: Ameland-Midden				
RSP 8.400 - Strand, Referentie	59	63	64	62
RSP 12.200 - Zeezijde, Suppletie 1992	24	13	14	17
RSP 15.000 - Zeezijde, Suppletie 1990	12	14	11	12
Texel: Eierland				
RSP 26.600 - Nat strand, Suppletie 1979-1995	48	-	-	48
RSP 26.600 - Droog strand, Suppletie 1979-1995	19	21	-	20
RSP 26.600 - Top, Suppletie 1979-1990	53	-	-	53
RSP 27.400 - Droog strand, Suppletie 1994	82	61	-	72
Noord-Holland: Camperduin-Egmond				
RSP 30.250 - Strand, Referentie	68	-	-	68
RSP 32.400 - Banket, Suppletie 1992	56	56	-	56
Rijnland: Meijndel				
RSP 93.500 - Strand, Referentie	53	49	-	51
RSP 93.500 - Top, Referentie	35	-	-	35
Schouwen: Kop van Schouwen				
RSP 10.441 - Strand, Referentie	53	55	-	54
RSP 13.545 - Top klif, Referentie	55	70	-	63
RSP 13.545 - Suppletie 1991	36	45	-	41

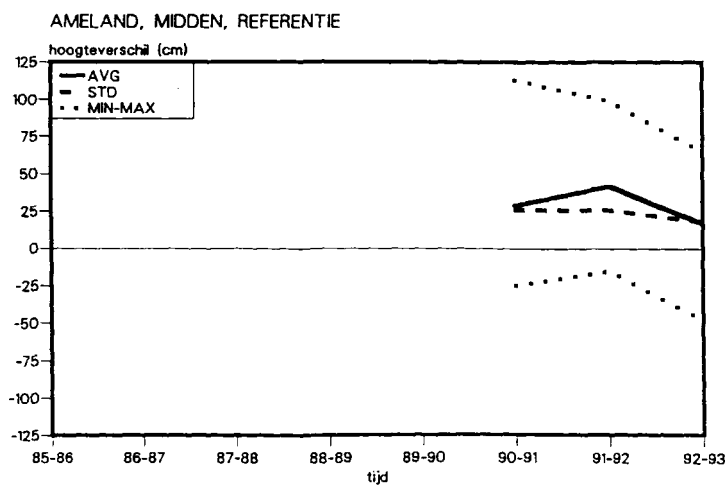
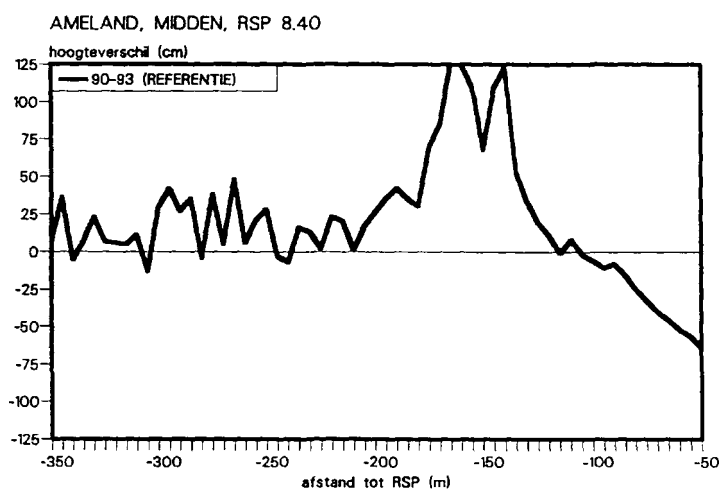
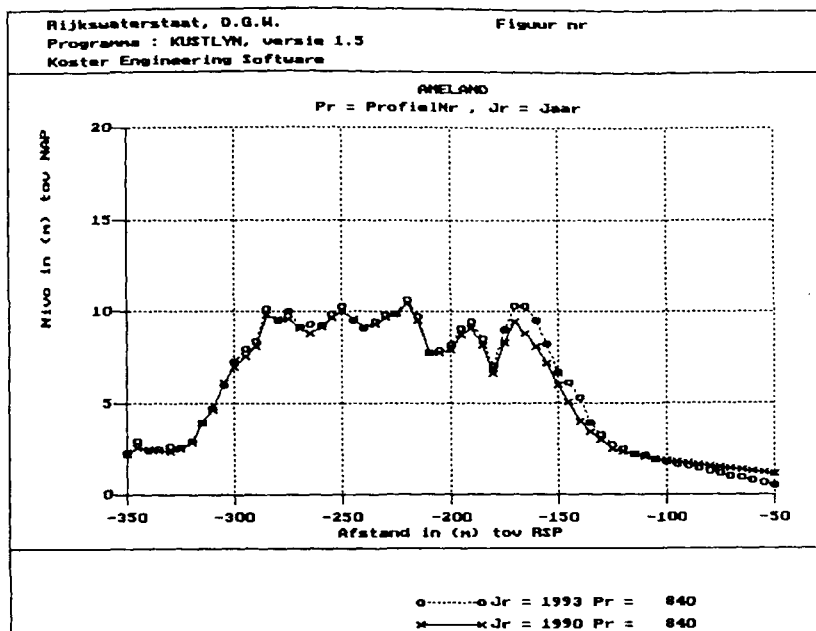
Hoeveelheid tijdens het experiment in de windtunnel verstoven materiaal in procenten van de hoeveelheid aan de wind blootgesteld materiaal. Voor een beschrijving van het experiment wordt verwezen naar paragraaf 2.1.7.

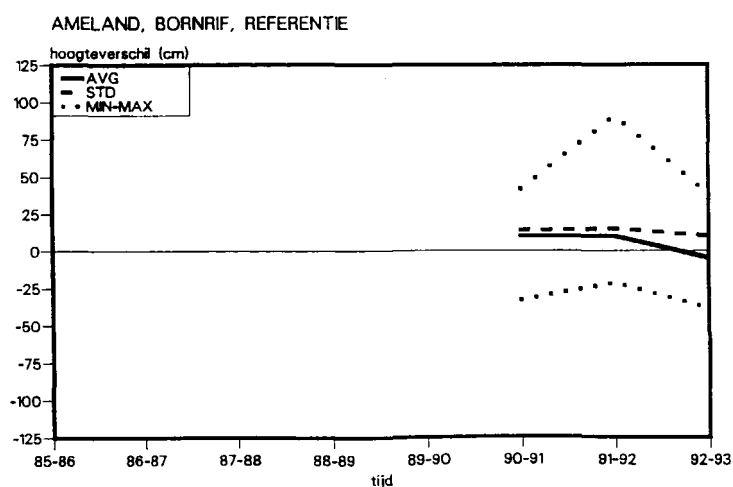
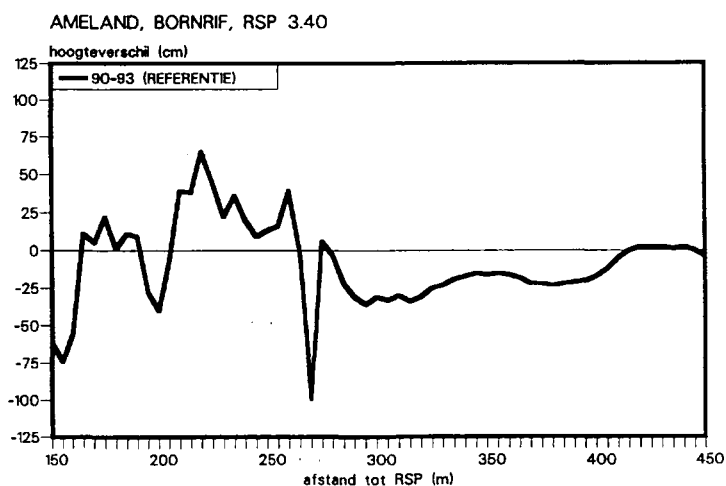
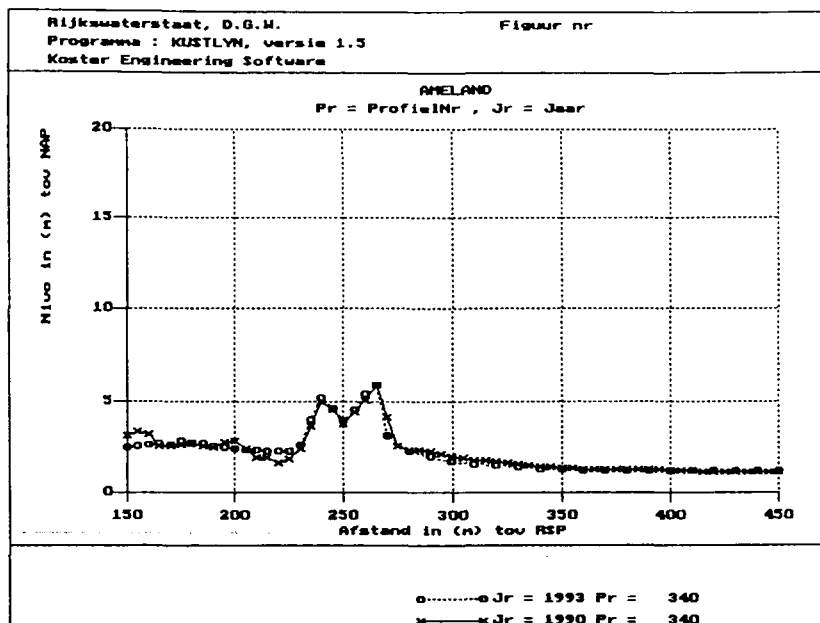
BIJLAGE 6. ZANDBUDGET PER GEBIED

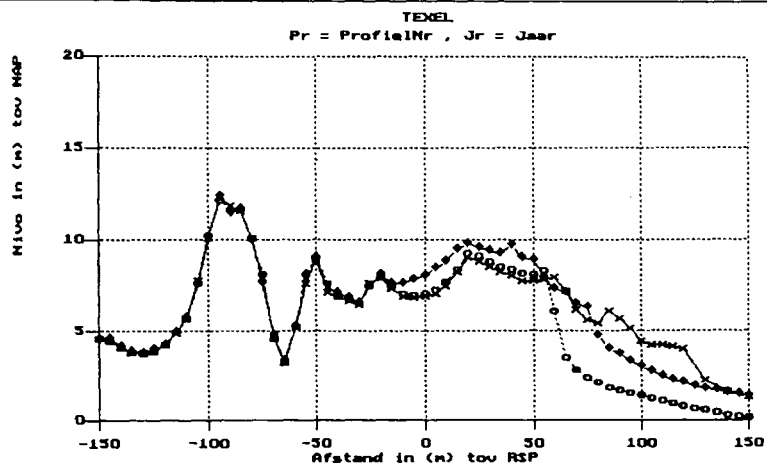
Representatief JARKUS-profiel van de zeereep in het gebied, hoogteverschil over de breedte van dit JARKUS-profiel en zandbudget van de zeereepkruin, berekend aan de hand van JARKUS-gegevens van het gehele gebied van:

- *Ameland, Midden, suppletie in 1980, 1990 en 1992*
 - *Ameland, Midden, referentie*
 - *Ameland, Bornrif, referentie*
 - *Texel, Eierland, suppletie in 1985, 1990 en 1994*
 - *Texel, De Koog, suppletie in 1984 en 1991*
 - *Noord-Holland, Zwanenwater, suppletie in 1987*
 - *Noord-Holland, Schoorl, referentie*
 - *Noord-Holland, Bergen-Egmond, suppletie in 1990 en 1992*
 - *Rijnland, Meijendel, suppletie in 1994*
 - *Goeree, Kwade Hoek, referentie*
 - *Schouwen, Kop van Schouwen, referentie*
 - *Schouwen, Kop van Schouwen, suppletie in 1987 en 1991*
 - *Walcheren, Westkapelle-Zoutelande, suppletie in 1990 en 1991.*
- Zie paragraaf 2.1.9 voor een toelichting van de gevolgde methoden.*



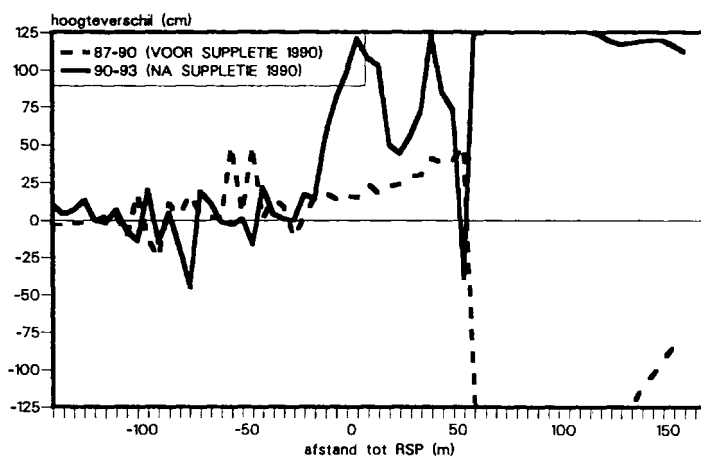




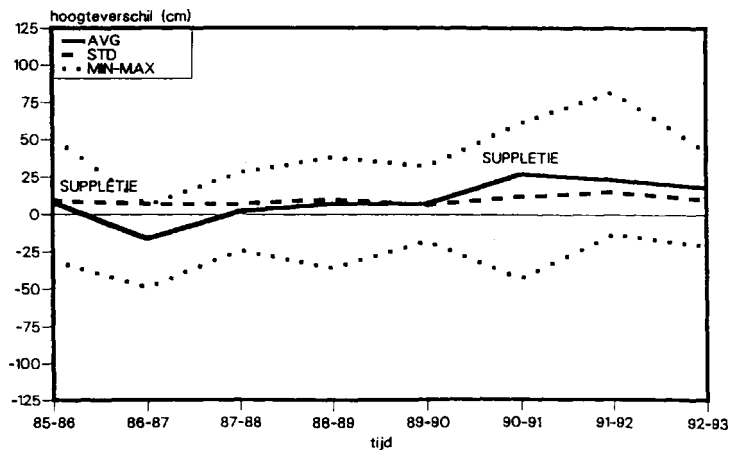


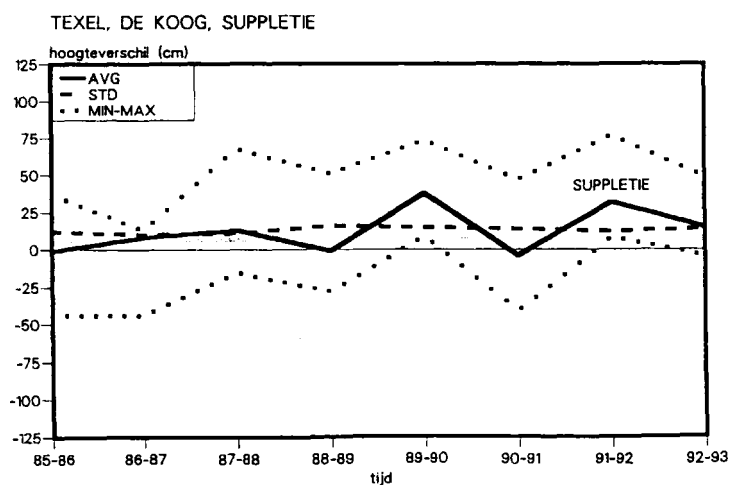
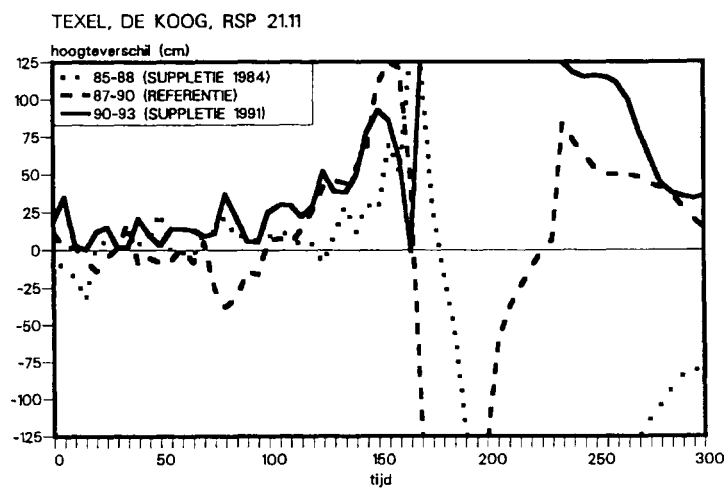
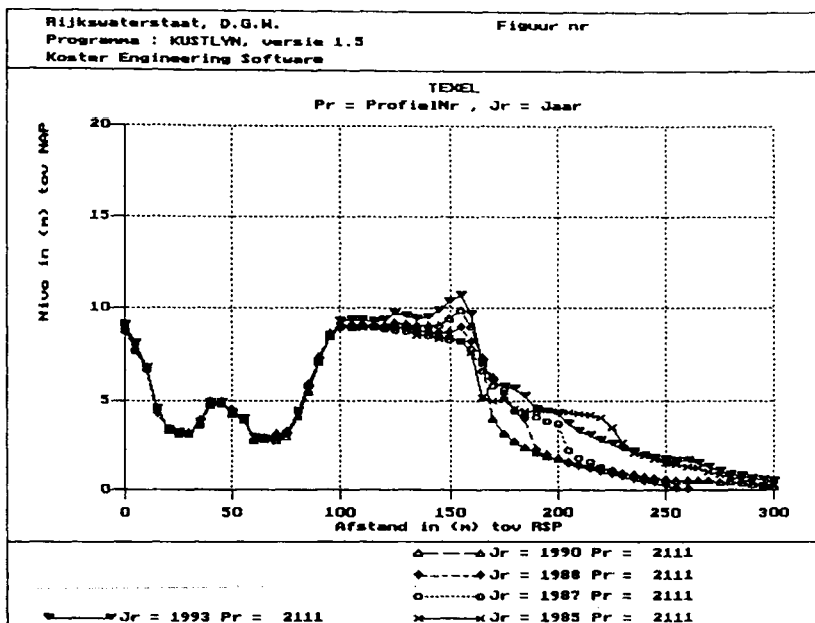
◆-----◆ Jr = 1993 Pr = 2740
 ○-----○ Jr = 1990 Pr = 2740
 ×-----× Jr = 1987 Pr = 2740

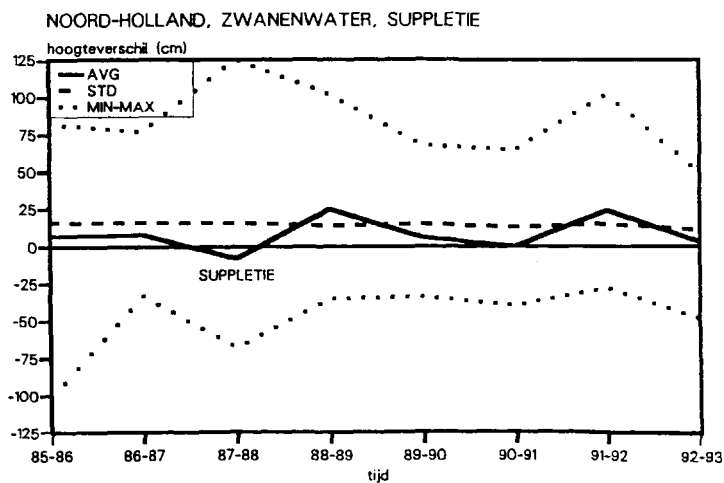
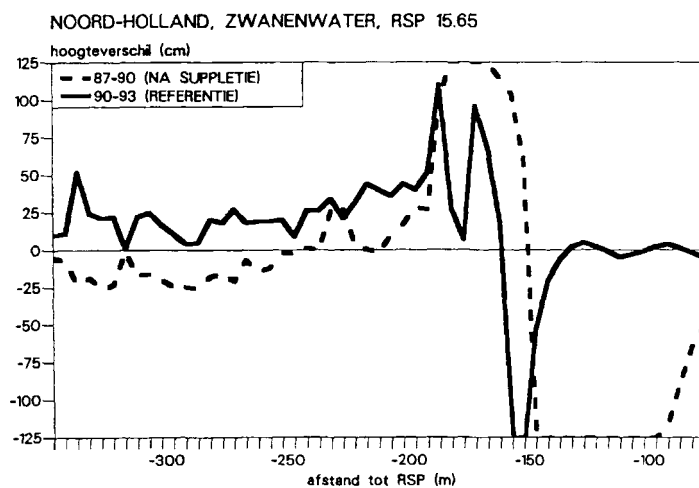
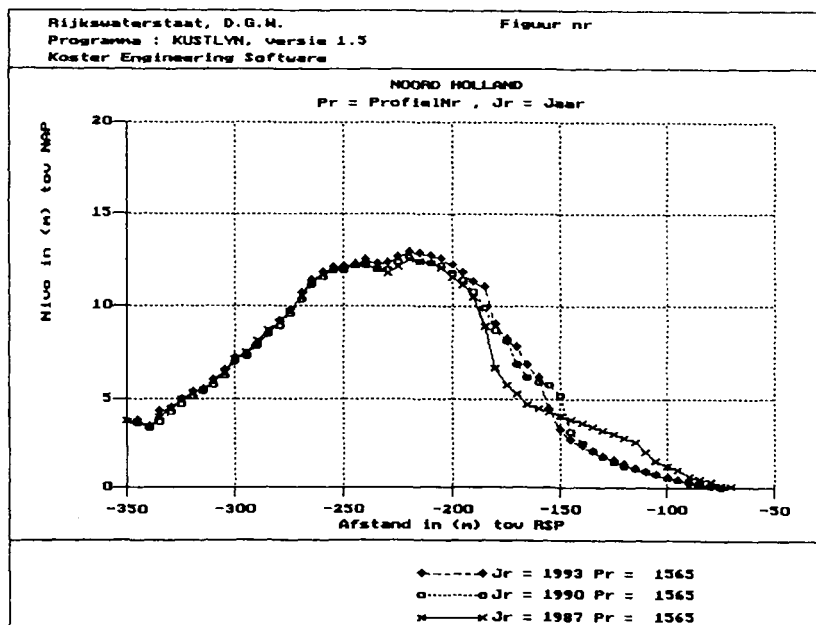
TEXEL, EIERLAND, RSP 27.40

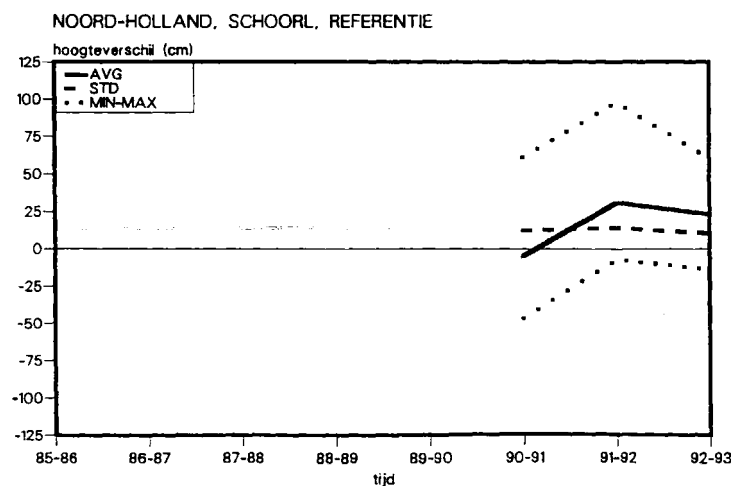
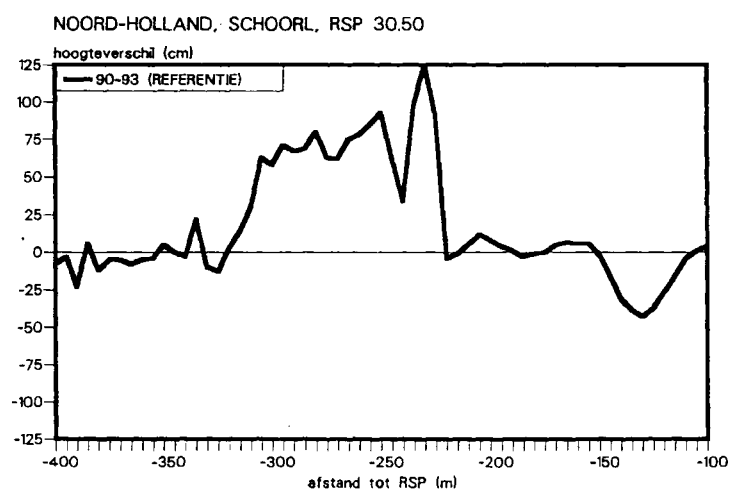
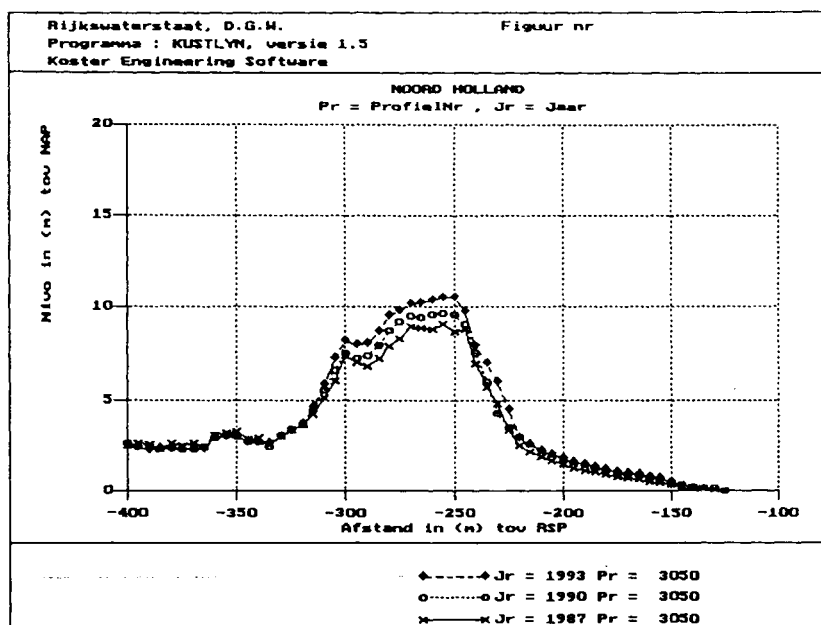


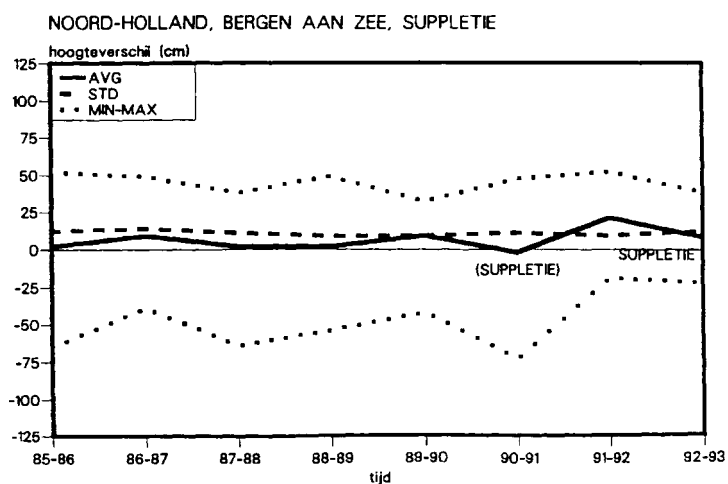
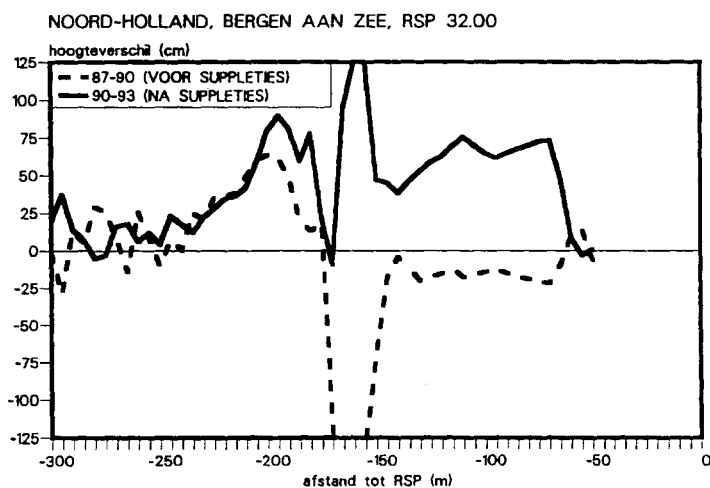
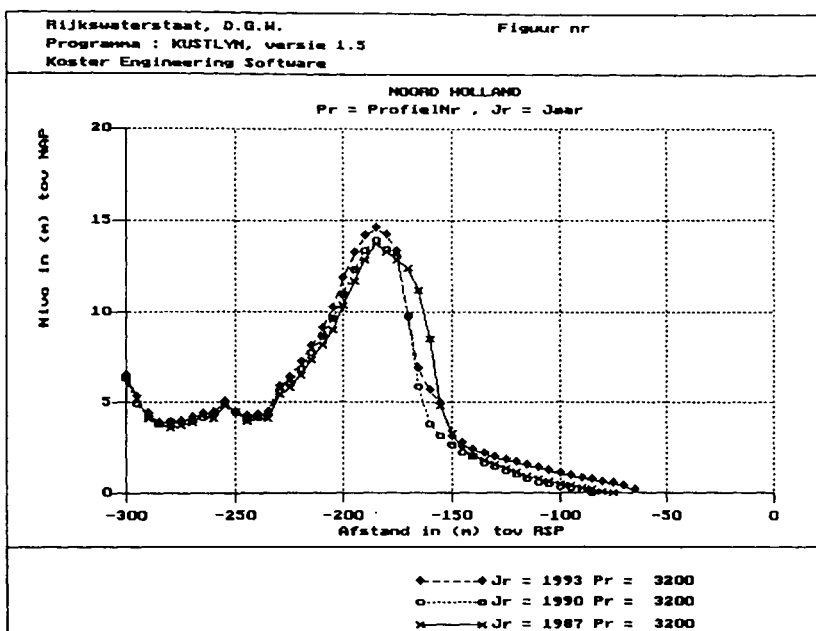
TEXEL, EIERLAND, SUPPLETIE

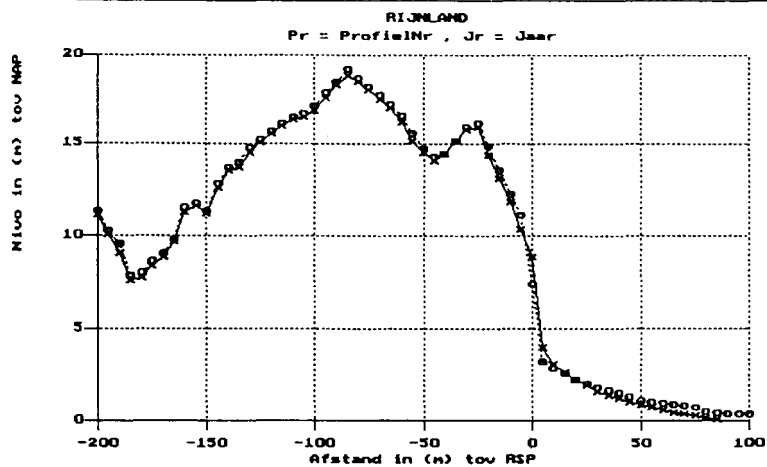






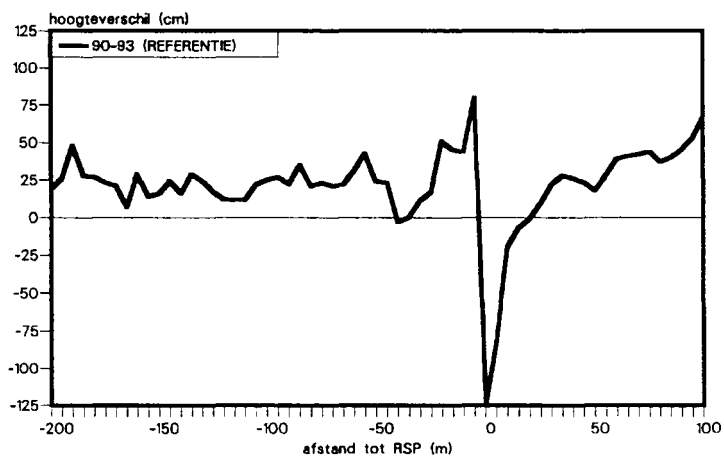




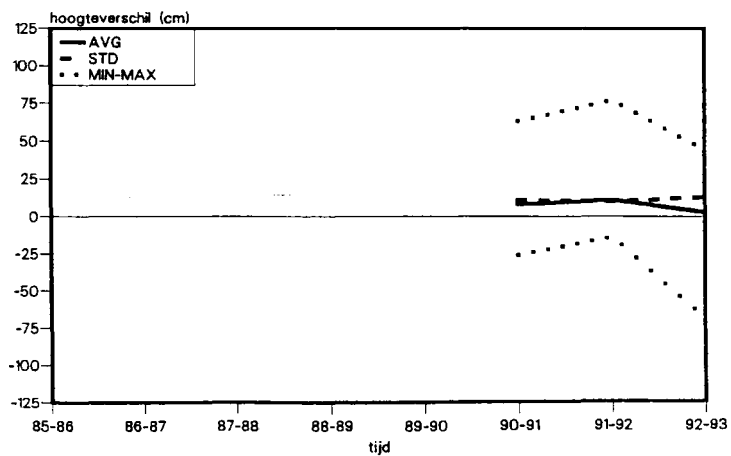


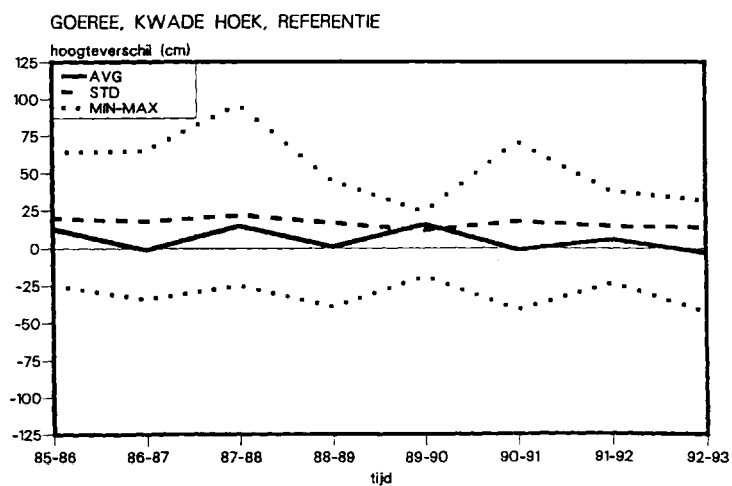
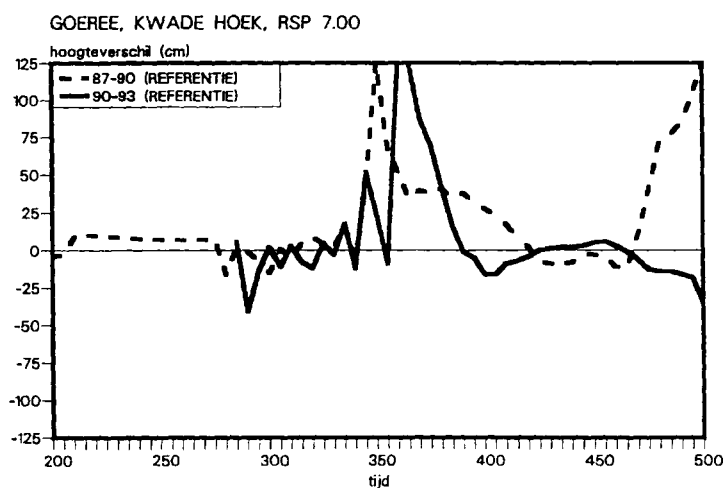
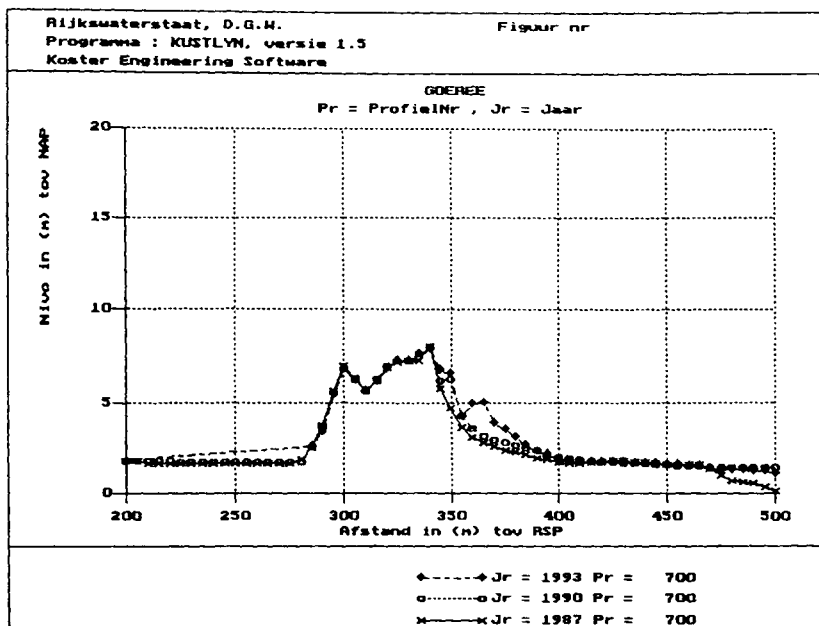
o-----o Jr = 1993 Pr = 9400
 x-----x Jr = 1990 Pr = 9400

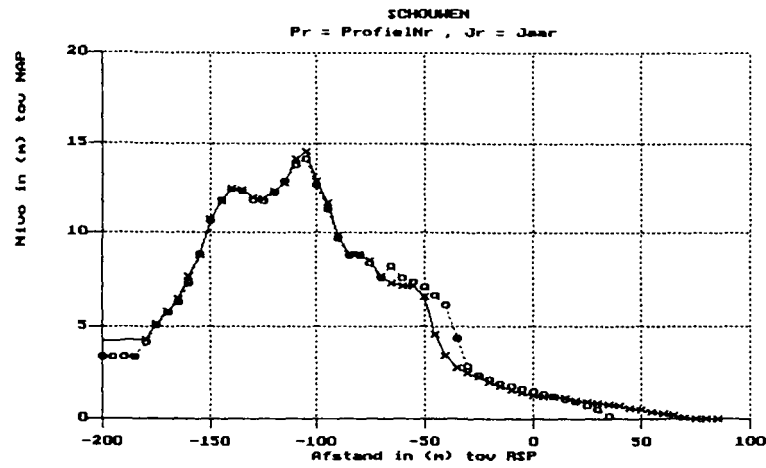
RIJNLAND, MEIJENDEL, RSP 94.00



RIJNLAND, MEIJENDEL, SUPPLETIE 1994

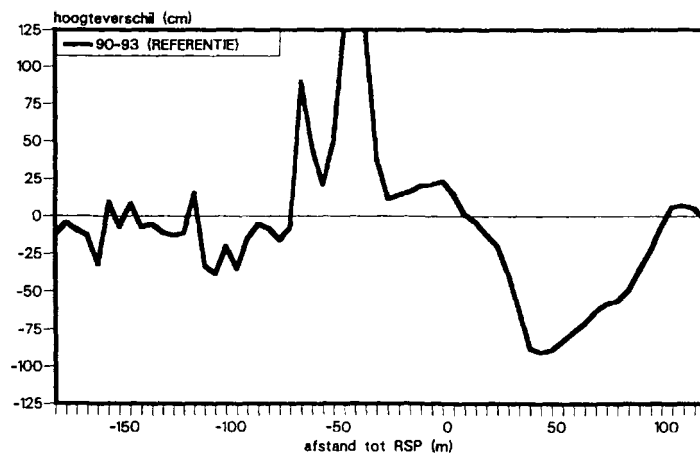




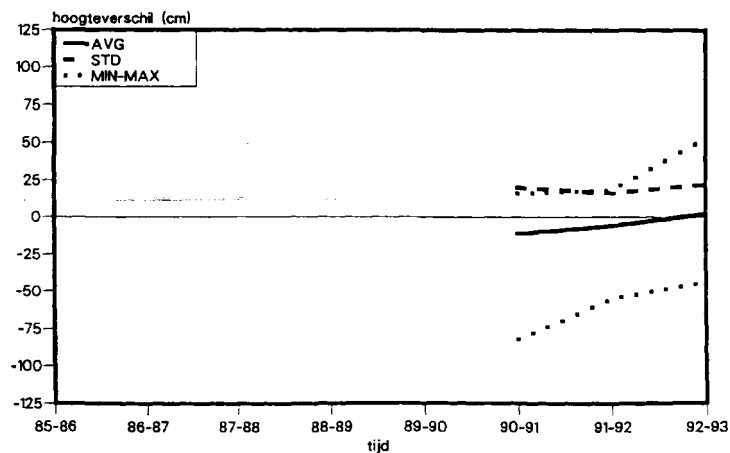


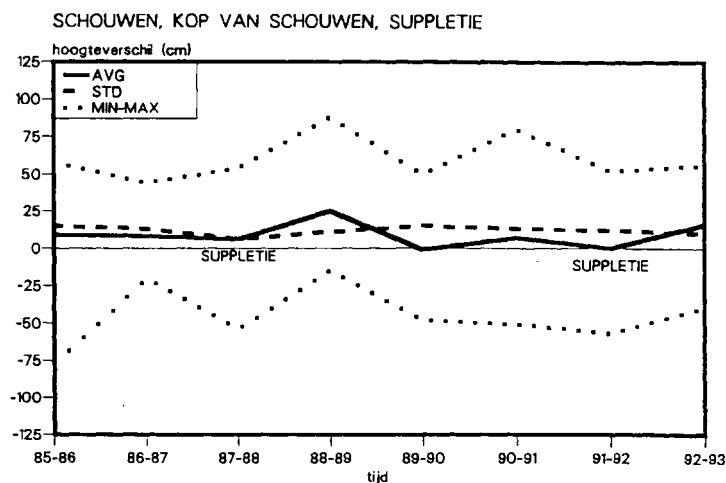
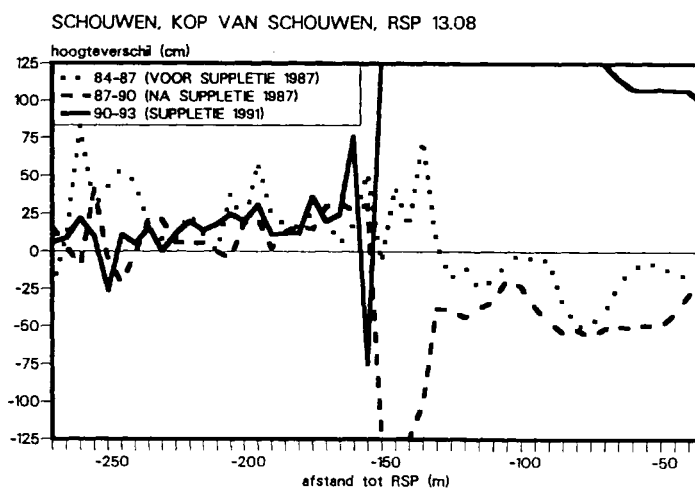
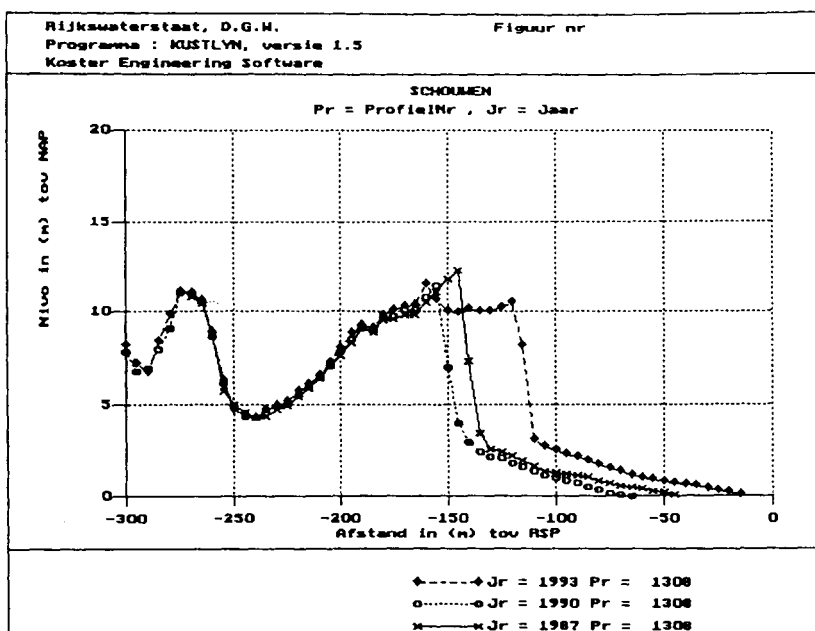
o-----o Jr = 1993 Pr = 1084
 x-----x Jr = 1990 Pr = 1084

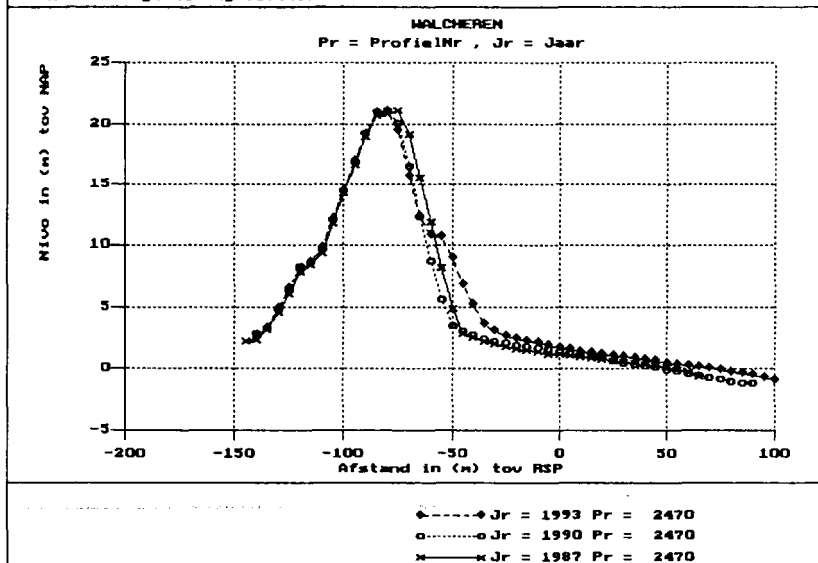
SCHOUWEN, KOP VAN SCHOUWEN, RSP 10.84



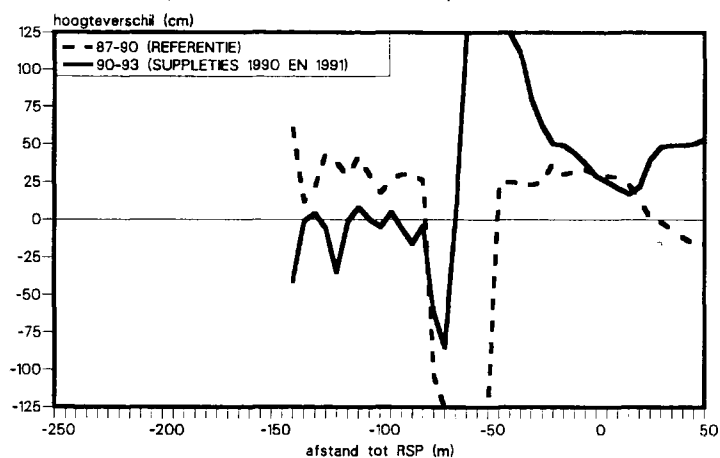
SCHOUWEN, KOP VAN SCHOUWEN, REFERENTIE



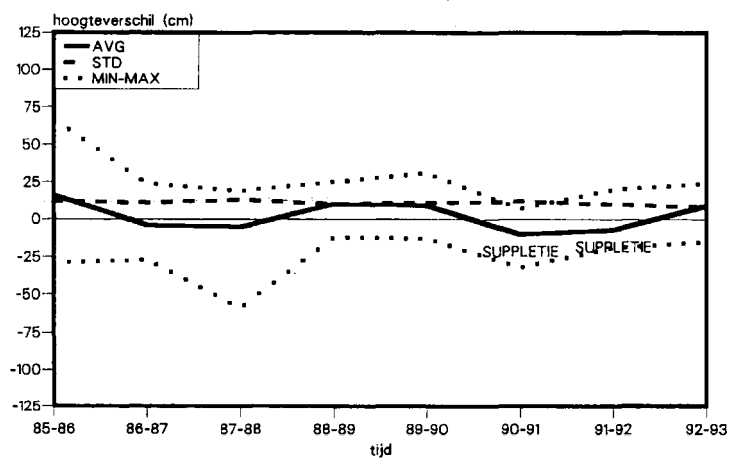




WALCHEREN, WESTKAPELLE-ZOUTELANDE, RSP 24.70



WALCHEREN, WESTKAPELLE-ZOUTELANDE, SUPPLETIE



BIJLAGE 7. AANSTUIVING

KUSTVAK	LOKATIE	STATUS	N	PARAMETER	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92	92-93
AMELAND	MIDDEN	SUP	13							SUP		
				AVG		3	-12	6	-8	136	22	0
				STD		9	6	6	10	61	14	11
				MIN		-21	-32	-15	-37	-29	-29	-41
				MAX		43	11	34	29	332	91	43
AMELAND	MIDDEN	REF	10									
				AVG						29	42	17
				STD						26	26	18
				MIN						-25	-15	-48
				MAX						113	99	65
AMELAND	BORNRIJF	REF	8									
				AVG						10	10	-5
				STD						14	15	10
				MIN						-33	-21	-39
				MAX						42	91	38
TEXEL	EIERLAND	SUP	10		SUP					SUP		
				AVG	8	-16	2	7	7	27	23	18
				STD	9	7	7	10	6	12	15	10
				MIN	-31	-49	-24	-36	-18	-43	-13	-21
				MAX	52	6	28	38	32	61	82	42
TEXEL	DE KOOG	SUP	3								SUP	
				AVG	-1	8	13	-1	38	-4	32	15
				STD	12	10	11	16	15	14	12	14
				MIN	-44	-44	-15	-28	9	-41	8	-4
				MAX	37	13	68	51	74	47	77	49
N-HOLLAND	ZWANENWATER	SUP	10				SUP					
				AVG	7	8	-8	25	6	0	24	3
				STD	16	16	16	14	15	13	15	11
				MIN	-101	-33	-68	-35	-34	-40	-28	-48
				MAX	82	77	135	102	68	65	102	50
N-HOLLAND	SCHOORL	REF	7									
				AVG						-5	31	23
				STD						12	14	10
				MIN						-47	-7	-14
				MAX						61	98	60
N-HOLLAND	BERGEN	SUP	10							(SUP)		SUP
				AVG	2	9	2	2	9	-2	21	8
				STD	12	14	11	9	9	11	9	12
				MIN	-65	-39	-64	-54	-42	-73	-19	-22
				MAX	52	49	38	49	32	47	52	38
RIJNLAND	MEIJENDEL	REF	10									
				AVG						8	11	3
				STD						11	10	13
				MIN						-26	-14	-69
				MAX						63	77	44
GOEREE	KWADE HOEK	REF	3									
				AVG	13	-1	15	1	16	-1	6	-3
				STD	20	18	22	17	12	18	15	14
				MIN	-25	-34	-25	-39	-19	-41	-23	-42
				MAX	64	65	96	45	24	71	38	32
SCHOUWEN	KOP	REF	3									
				AVG						-11	-6	2
				STD						20	16	22
				MIN						-82	-55	-44
				MAX						16	18	53
SCHOUWEN	KOP	SUP	10				SUP				SUP	
				AVG	9	8	6	25	-1	7	0	16
				STD	15	13	6	11	15	13	12	10
				MIN	-78	-20	-54	-15	-48	-51	-57	-39
				MAX	58	44	54	88	50	80	52	56
WALCHEREN	WKAP-ZIJL	SUP	3							SUP	SUP	
				AVG	16	-4	-5	10	9	-10	-7	9
				STD	12	11	13	10	11	12	10	8
				MIN	-29	-27	-59	-12	-13	-32	-19	-15
				MAX	67	24	19	25	31	7	20	24

Gemiddelde (AVG), standaarddeviatie (STD), minimum (MIN) en maximum (MAX) aanstuiving naar de zeereepkruin van N raaien in een aantal suppletie- en referentiegebieden. De aanstuiving is uitgedrukt in cm/jaar.

BIJLAGE 8. VERWACHTINGEN EN RESULTATEN

Parameter	Ameland: Midden	Texel: Eierland (1994)	Noord-Holland: Zwanenwater	Noord-Holland: Camperduin- Egmond	Rijnland: Meijndel	Schouwen: Kop
Gegevens van onderzoek in het wingebied						
d ₅₀	○	●	●	○	●	●
d ₆₀ /d ₁₀	●	●	●	(○)	●	(●)
d ₉₀ /d ₁₀	●	○	○	○	●	(●)
klei en silt	○	⊗	⊗	○	⊗	⊗
grind	○	⊗	⊗	○	⊗	○
org	○	⊗	⊗	○	⊗	○
schelp	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Verwachting op grond van gegevens van onderzoek in het wingebied						
stuifgevoeligheid	⊗	⊗	⊗	●	⊗	⊗
Gegevens van onderzoek in het veld						
d ₅₀	○	●	●	○	○	○
d ₆₀ /d ₁₀	●	○	⊗	○	⊗	●
d ₉₀ /d ₁₀	●	○	⊗	○	⊗	●
klei en silt	○/⊗	○		○	○	○/⊗
grind	○	⊗		○	○	○
org	○	○		○	○	○
schelp	●	⊗	⊗	⊗	○	●
Gegevens van windtunnelonderzoek						
stuifgevoeligheid	○	●		●		○
Gegevens uit het JARKUS/DONAR-bestand						
aanstuiving	⊗	●	⊗	⊗		○

Materiaaleigenschappen van zand in het wingebied en in het veld en de verwachte en gemeten stuifgevoeligheid van het suppletie-zand, ingedeeld in klassen:

- mediaan d_{50} :
○: 212-250 μm ; ●: 250-300 μm
- geschiktheid voor compactie, gelijkvormigheids-coëfficiënt d_{60}/d_{10} :
○: < 1.50; ⊗: 1.50-1.65; ●: > 1.65
- spreiding d_{90}/d_{10} :
○: < 2; ⊗: 2-3; ●: > 3
- gehalte aan klei, silt, grind, org(anische stof) en schelp(fragment)en:
○: weinig; ⊗: matig; ●: veel (zie Bijlage 2)
- stuifgevoeligheid:
○: 0-45% tijdens windtunnelexperiment verstoven;
⊗: 45-55% tijdens windtunnelexperiment verstoven;
●: 55-100% tijdens windtunnelexperiment verstoven
- aanstuiving naar de zeereepkruin:
○: tot gemiddeld 20 cm aanstuiving per jaar;
⊗: tot gemiddeld 25 cm aanstuiving per jaar;
●: tot gemiddeld 30 cm aanstuiving per jaar.

BIJLAGE 9. BEPALING VAN DE HELLINGSHOEK EN DE LENGTE VAN DE HELLING

Schouwen

