



Opdrachtgever:

Projectbureau Zwakke Schakels Zeeland

Versterking Zwakke Schakel West Zeeuwsch-Vlaanderen

**Achtergrondrapportage
duinveiligheid en morfologie**

Samenvattend document

A1642

November 2007

Opdrachtgever **DHV i.o.v. projectbureau
Zwakke Schakels Zeeland**

Titel **Versterking Zwakke Schakel
West Zeeuwsch-Vlaanderen**

Achtergrondrapportage duinveiligheid en morfologie

Samenvatting In het kader van de door het Projectbureau Zwakke Schakels Zeeland opgestarte tweede fase van de planstudie voor de kustversterking van West Zeeuwsch-Vlaanderen moet een MER worden opgesteld. Als onderdeel daarvan is ook een daaraan gekoppelde hydro/morfologische studie uitgevoerd en een ontwerp van een kustversterkingsplan gemaakt. Voorliggend document omvat de integrale achtergrondrapportage ten aanzien van de duinveiligheids en morfologische aspecten.

Referenties Alkyon-offerte met kenmerk A1642P1r2 d.d. 6 februari 2006
Opdracht met kenmerk WG-SE20060542 d.d. 27 april 2006
Projectleider Alkyon: Dr.Ir. H.J. Steetzel
Medewerkers: Dr. J. Cleveringa, Ir. C.E. Jacobs

Rev.	Auteur	Datum	Bijzonderh.	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
0	H.J. Steetzel		Interim-versie		H.J. Steetzel
1	H.J. Steetzel		Tussenconcept		
2	H.J. Steetzel	6 juli '07	Eindconcept		H.J. Steetzel
3	H.J. Steetzel	5 nov. '07	Eindrapport	R.C. Steijn	H.J. Steetzel

Document specificaties	Inhoud	Status
Rapport nummer: A1642R1	tekst pagina's : 84	☐ voorlopig
Sleutelwoorden: Breskens, Cadzand-Bad, duinontwerp,	tabellen : 38	☐ concept
waterkering, duinveiligheid, morfologie	figuren : 103	☒ eindrapport
Project nummer: A1642	appendices : -	
Bestand: A1642R1r3.doc		



Samenvatting

In het kader van de door het Projectbureau Zwakke Schakels Zeeland opgestarte tweede fase van de planstudie voor de kustversterking van West Zeeuwsch-Vlaanderen moet een MER worden opgesteld.

Als onderdeel daarvan is ook een daaraan gekoppelde hydro/morfologische studie uitgevoerd en een ontwerp van een kustversterkingsplan gemaakt.

Voorliggend document omvat de integrale achtergrondrapportage ten aanzien van de duinveiligheids en morfologische aspecten.

Het eerste deel van deze rapportage is grotendeels gebaseerd op de uitwerkingen zoals deze tot het najaar van 2006 zijn uitgevoerd.

In de eindfase van de studie zijn een aantal meer specifieke vraagstukken uitgewerkt. Deze in eerste instantie in de vorm van korte notities en memo's vastgelegde rapportages zijn in het voorliggende document onder het kopje 'versterkingsplannen' gebundeld weergegeven.

Op deze wijze omvat deze rapportage feitelijk alle op het gebied van duinveiligheid en morfologie uitgevoerde studieonderdelen.



Inhoudsopgave

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Samenvatting

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel en aanpak	1
1.3	Opzet van het rapport	2
1.4	Totstandkoming	4
2	Uitgangspunten duinveiligheidsberekeningen	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Gebruikt rekenmodel	5
2.3	Beschouwde scenario's	6
2.4	Hydraulische randvoorwaarden (belasting)	6
2.4.1	Huidige situatie	6
2.4.2	Toekomstige situaties	7
2.5	Dwarsprofiel (sterkte)	8
2.5.1	Algemeen	8
2.5.2	Opnamejaar	8
2.5.3	Korrelmateriaal	9
2.5.4	Aangepaste profielvorm a.g.v. zeespiegelstijging	10
2.6	Gecombineerde zeespiegelstijging en kustonderhoud	10
2.6.1	Normale gesuppleerde strandprofielen	10
2.6.2	Afwijkende situaties	10
2.6.3	Samenvatting	11
2.6.4	Slotopmerkingen	11
2.7	Interactie met reeds aanwezige dijk	11
2.7.1	Algemeen	11
2.7.2	Dijk-achter-duin (zeewaartse versterking)	12
2.7.3	Duin-achter-dijk (landwaartse versterking)	12
2.7.4	Samenvatting	13
2.7.5	Kwantificering 'brestoeslag' (bij landwaartse versterkingen)	13
3	Resultaten duinafslagberekeningen	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Uitgangspunten vormgeving versterkingen	17
3.3	Berekeningsresultaten	18
3.3.1	Algemeen	18
3.3.2	Huidige situatie	19
3.3.3	Landwaartse versterkingen	19
3.3.4	Zeewaartse versterkingen	20
3.4	Nadere analyse	20
3.4.1	Veiligheidshorizon	20
3.4.2	Landwaartse versterkingsomvang	20



3.4.3	Zeewaartse versterkingsomvang	20
3.4.4	Zeewaarts versus landwaarts	20
3.5	Gebruik resultaten	21
3.5.1	Bodemstijging	21
3.5.2	Anticipatie op meer gedetailleerde zeewaartse uitwerking	21
4	Resultaten detailberekeningen duinveiligheid	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Detailuitwerking traject Breskens-Oost	24
4.3	Detailuitwerking traject Breskens-Veste	24
4.4	Detailuitwerking traject Nieuwvliet-Bad - Groede	25
4.5	Detailuitwerking traject Cadzand-bad	26
5	Morfologie westkust Zeeuwsch-Vlaanderen	28
5.1	Inleiding	28
5.2	Noordzeekust Zeeuwsch-Vlaanderen	28
5.2.1	Inleiding	28
5.2.2	Grote variaties	28
5.2.3	Aanwezigheid paalhoofden	29
5.2.4	Zandgolven	29
5.3	De monding van de Westerschelde	30
5.3.1	Inleiding	30
5.3.2	Geomorfologische elementen	31
5.3.3	Zandbalans mondingsgebied	31
5.4	Nadere karakterisering deeltrajecten	32
5.4.1	Breskens tot Nieuwvliet	32
5.4.2	Traject Nieuwvliet-Bad/Groede	33
5.4.3	Verdronken Zwarte Polder	33
5.4.4	Cadzand-Bad	34
5.5	Uitgevoerd kustonderhoud	34
5.6	Kustlijnposities en trends	35
6	Nadere morfologische analyses	38
6.1	Inleiding	38
6.2	Kustvak Breskens-Oost	38
6.2.1	Ontwikkeling dwarsprofielen	38
6.2.2	Lokaal morfologisch systeem	39
6.2.3	Consequenties t.a.v. mogelijke versterking	40
6.2.4	Voorgestelde ingrepen	40
6.3	Traject Cadzand-Bad - VZP	41
6.3.1	Ontwikkeling dwarsprofielen	41
6.3.2	Morfologisch systeem	42
6.3.3	Consequenties t.a.v. mogelijke versterking	43
6.3.4	Voorgestelde ingrepen	43
7	Morfologisch model Zwin-Nieuwesluis	46
7.1	Inleiding	46
7.2	Het gebruikte rekenmodel: PONTOS	46
7.2.1	Het ontwikkeltraject	46
7.2.2	Beschikbare versies	46
7.2.3	Geschiktheid model	47



7.2.4	Gebruik van het model in de praktijk	48
7.2.5	Betrouwbaarheid van de modelresultaten	49
7.3	Modelopzet en aanpak	49
7.3.1	Opzet rekenmodel	49
7.3.2	Toekomstige ontwikkelingen: zeespiegelstijging	49
7.3.3	Kustlijnonderhoud: handhaving/vaststelling van BKL	50
7.4	Definitie modelinvoer	50
7.4.1	Algemeen	50
7.4.2	Referentielijn	50
7.4.3	Laagposities	50
7.4.4	Duinniveau	51
7.4.5	Constructies: strekdammen en dijken	51
7.4.6	Golf- en getijklimaat	52
7.4.7	Klimaatmutaties	53
7.4.8	Kustonderhoud	53
7.5	De afregeling van het model	53
7.5.1	Algemeen	53
7.5.2	Dwarstransport	53
7.5.3	Langstransport en kustonderhoud	54
7.6	Voorspellingen	54
8	Resultaten morfologisch model en analyses	56
8.1	Inleiding	56
8.2	Beschouwde varianten t.b.v. MER-studie	56
8.2.1	Referentiesituatie	56
8.2.2	MER-varianten	57
8.2.3	Nadere definitie varianten	58
8.3	Extra onderhoudsbehoeftes (t.b.v. MER)	59
8.3.1	Algemeen	59
8.3.2	Versterkingen traject Cadzand-Bad	59
8.3.3	Versterkingen traject Herdijkte Zwarte Polder	60
8.3.4	Versterkingen traject Groede	60
8.3.5	Versterkingen traject Waterdunen (west)	61
8.4	Nadere analyses en overwegingen	62
8.4.1	Morfologie niet gemodelleerde secties	62
8.4.2	Uitvoerbaarheid verre zeewaartse versterkingen (tot 200 jaar)	62
8.4.3	Zeewaartse uitbouw in relatie tot verlenging strandhoofden	63
9	Uitwerkingen t.b.v. definitief versterkingsplan	64
9.1	Algemeen	64
9.2	Kustverdediging Waterdunen	64
9.2.1	Aanleiding en achtergrond	64
9.2.2	Aanwezige dwarsprofielen	64
9.2.3	Karakteristieke dwarsprofiel en duinafslag bij normconditie	64
9.2.4	Duinafslag in huidige situatie	65
9.2.5	Duinafslag in de toekomst	65
9.2.6	Profielontwikkeling berekend met DUROSTA	66
9.2.7	Effect 'echte' stormvloed berekend met DUROSTA	67
9.2.8	Conclusies en implicaties	68
9.3	Toepassing slijtlaag	69
9.3.1	Aanleiding en achtergrond	69



9.3.2	Posities vastgestelde BKL en opgetreden MKL	70
9.3.3	Ontwikkeling MKL-posities	70
9.3.4	MKL-ontwikkeling Cadzand-Bad	70
9.3.5	Ontwikkeling bij versterkte kust (met robuust verschoven BKL)	70
9.3.6	Ontwikkeling bij versterkte kust met geleidelijk verschoven BKL	71
9.3.7	Robuustheid in relatie tot nieuwe rekenregel	72
9.4	Herdijkte Zwarte Polder	72
9.4.1	Inleiding	72
9.4.2	Dijk als duin	73
9.4.3	Dijk als dijk	73
9.4.4	Duin voor dijk	73
9.4.5	Vergelijking opties	75
9.4.6	Opsluitdam op hoek Herdijkte Zwarte Polder	75
9.5	Duin-voor-dijk bij Nieuwvliet	76
9.5.1	Inleiding	76
9.5.2	Huidig beschermingsniveau	77
9.5.3	Toelaatbare condities	77
9.5.4	Nadere uitwerkingen	79
9.5.5	Conclusies	80
9.6	Duin-achter-dijk	80
9.7	Zeewaartse uitwerking Nieuwvliet-Groede	81
9.8	Compartimenteringsdam kustvak Breskens-Oost	81

Referenties

Tabellen

Figuren



Lijst van tabellen

- 1.1 Overzicht structuur achtergrondrapportage duinveiligheid en morfologie
- 2.1 *) Overzicht raailocaties westkust Zeeuwsch-Vlaanderen
- 2.2 Overzicht samenstelling bestanddelen afslagvolumes boven rekenpeil
- 2.3 Overzicht gehanteerde combinaties versterkingsrichting en zichtperiode
- 2.4 Overzicht bereik parameterwaarden voor huidige situatie
- 2.5 *) Overzicht huidige hydraulische randvoorwaarden per locatie
- 2.6 Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden toekomstige situaties
- 2.7 *) Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden per locatie
- 2.8 Overzicht relevante combinaties profiel/opnamejaar en berekeningsdoel
- 2.9 *) Overzicht aanvullende informatie per locatie
- 2.10 Overzicht korreldiameter duinmateriaal volgens ENW/TAW-1984
- 2.11 Overzicht reguliere profielaanpassing als functie van zichtperiode
- 2.12 Overzicht mogelijke profielaanpassingen
- 2.13 Overzicht versterkingsopties bij een (te zwak) dijkprofiel
- 3.1 *) Resultaten huidige situatie
- 3.2a *) Resultaten voor landwaartse versterkingen (zonder bodemstijging)
- 3.2b *) Resultaten voor landwaartse versterkingen (met bodemstijging)
- 3.3a *) Resultaten voor zeewaartse versterkingen (zonder bodemstijging)
- 3.3b *) Resultaten voor zeewaartse versterkingen (met bodemstijging)
- 3.4a *) Overzicht veiligheidshorizon (zonder bodemstijging)
- 3.4b *) Overzicht veiligheidshorizon (met bodemstijging)
- 4.1 Overzicht geselecteerde raaien voor detailuitwerkingen
- 4.2 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofiel Breskens
- 4.3 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofiel Scheldeveste
- 4.4 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofielen traject Nieuwvliet-Bad - Groede
- 4.5 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofiel Verdrongen Zwarte Polder
- 4.6 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofielen traject Cadzand-Bad
- 4.7 Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofielen traject Zwin
- 5.1 Overzicht BKL- en trendwaarden
- 7.1 Relatie tussen RSP-raaien en locatie op PONTOS-grid voor een aantal JARKUS-raaien
- 7.2 Overzicht gehanteerde modellagen
- 8.1 Overzicht beschouwde varianten voor morfologische berekeningen
- 8.2 Overzicht mutaties ten opzichte van referentievariant
- 8.3 Overzicht extra onderhoud (in 1.000 m³/jaar) versterkingsopties Cadzand-Bad
- 8.4 Overzicht extra onderhoud (in 1.000 m³/jaar) versterkingsopties Groede
- 8.5 Overzicht extra onderhoud (in 1.000 m³/jaar) versterkingsopties Waterdunen
- 9.1 Hydraulische condities bij lagere overschrijdingskansen



9.2 Hydraulische condities voor toekomstige omstandigheden

**) Tabel separaat toegevoegd; rest in de lopende tekst.*



Lijst van figuren*)

- 1.1 Onderzochte aspecten in tijd en ruimte: duinveiligheid en morfologie;
Relatie tussen omvang kustversterking en veiligheidsniveau
- 2.1 Overzicht westkust Zeeuwsch-Vlaanderen; Locatie beschouwde raaien inclusief detailraaien
- 2.2 Vergelijking principe gehanteerde duinafslagmodellen
- 2.3 Overzicht langsverdeling rekenpeil en golfhoogte voor huidige situatie en situatie over 50, 100 en 200 jaar
- 2.4 Overzicht mogelijke profielaanpassingen bij stijgende zeespiegel en kustlijnonderhoud
- 2.5 Overzicht mogelijke versterkingsopties bij een (te zwak) dijkprofiel
- 2.6 'Brestoeslag' bij landwaartse versterking (te zwak) dijkprofiel
- 2.7 Kwantificering 'brestoeslag'
- 3.1 Overzicht veiligheidsproblematiek; Overzicht zwakke dwarsprofielen huidige situatie
- 3.2 Overzicht veiligheidsproblematiek; Overzicht zwakke dwarsprofielen situatie na 50 jaar
- 3.3 Overzicht veiligheidsproblematiek; Overzicht zwakke dwarsprofielen situatie na 100 jaar
- 3.4 Overzicht veiligheidsproblematiek; Overzicht zwakke dwarsprofielen situatie na 200 jaar
- 3.5a Overzicht omvang landwaartse versterking; Huidige situatie en na 50, 100 en 200 jaar; Zonder bodemstijging
- 3.5b Overzicht omvang landwaartse versterking; Huidige situatie en na 50, 100 en 200 jaar; Met bodemstijging
- 3.6a Overzicht omvang zeewaartse versterking Huidige situatie en na 50, 100 en 200 jaar; Zonder bodemstijging
- 3.6b Overzicht omvang zeewaartse versterking Huidige situatie en na 50, 100 en 200 jaar; Met bodemstijging
- 3.7a Overzicht zeewaartse versterking (50 jaar) en landwaartse versterking (50 jaar); Zonder bodemstijging
- 3.7b Overzicht zeewaartse versterking (50 jaar) en landwaartse versterking (50 jaar); Met bodemstijging
- 4.1 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Breskens; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 0.51
- 4.2 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Scheldeveste; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 1.71
- 4.3 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Nieuwvliet-Bad - Groede; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 5.84
- 4.4 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Nieuwvliet-Bad - Groede; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 6.84
- 4.5 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Nieuwvliet-Bad - Groede; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 7.30
- 4.6 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Nieuwvliet-Bad - Groede; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 7.78
- 4.7 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Cadzand-Bad; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 10.21



- 4.8 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Cadzand-Bad; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 10.68
- 4.9 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Cadzand-Bad; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 11.62
- 4.10 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Cadzand-Bad; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 12.14
- 4.11 Resultaat duinafslagberekeningen versterkte waterkering; Traject Cadzand-Bad; Situatie voor 50 en 100 jaar; km 13.35
- 5.1 Overzichtskaart Westerscheldemonding met plaatsaanduidingen
- 5.2a Overzichtskaart Breskens met locaties oostelijke en westelijke opsluitdam
- 5.2b Overzichtskaart kustdeel Nieuwesluis met relevante locaties
- 5.2c Overzichtskaart kustdeel Cadzand met relevante locaties
- 5.3 Overzichtskaart uitgevoerde suppleties als functie van tijd en kilometrering
- 5.4 Overzicht trend in kustlijnontwikkeling voor de Noordzeekust van het kustvak West Zeeuwsch-Vlaanderen; Overzicht en detail gedeelte traject Cadzand-Bad tot Nieuwesluis
- 6.1 Overzicht dwarsprofielen Breskens; Overzicht karakteristieke dwarsprofielen; Raaien 11 (oost), 31, 51 en 71 (west)
- 6.2a Overzicht tijdsontwikkeling dwarsprofielen Breskens voor raai 11 (oost) en 31; Dwarsprofielen 1994 t/m 2005
- 6.2b Overzicht tijdsontwikkeling dwarsprofielen Breskens voor raai 51 en 71 (west); Dwarsprofielen 1994 t/m 2005
- 6.3 Detail ontwikkeling dwarsprofielen Breskens voor raaien 11 (oost), 31, 51 en 71 (west); Vervorming en herverdeling aangebrachte suppletie
- 6.4a Ontwikkeling positie MKL in kustvak Breskens voor raaien 11 (oost), 31, 51 en 71 (west)
- 6.4b Ontwikkeling positie NAP+2m contour in kustvak Breskens voor raaien 11 (oost), 31, 51 en 71 (west)
- 6.5 Morfologisch systeem Breskens
- 6.6 Overzicht versterkingswerken Breskens-Oost
- 6.7 Overzicht relevante dwarsprofielen Cadzand-Bad; Oostelijke sectie van centrale deel (raai 1112 - 1214) en westelijke sectie van centrale deel (raai 1262 - 1335)
- 6.8 Overzicht naburige dwarsprofielen Cadzand-Bad; Aanliggend oostelijk deel richting Polder (raai 993 - 1092) en aanliggend westelijk deel richting Zwin (raai 1354 - 1487)
- 6.9a Overzicht tijdsontwikkeling dwarsprofielen Cadzand-Bad voor oostelijke raaien 1136 en 1191; Dwarsprofielen 1994 t/m 2004
- 6.9b Overzicht tijdsontwikkeling dwarsprofielen Cadzand-Bad voor westelijke raaien 1282 en 1318; Dwarsprofielen 1994 t/m 2004
- 6.10 Detail ontwikkeling dwarsprofielen Cadzand-Bad voor raaien 1136, 1191, 1282 en 1318
- 6.11 Ontwikkeling positie MKL in kustvak Cadzand-Bad voor raaien 1136, 1191, 1282 en 1318
- 6.12 Overzicht relevante dwarsprofielen Nieuwvliet-Kruishoofd
- 7.1 Overzicht opzet morfologisch model PONTOS; Positie gehanteerd coördinatensysteem
- 7.2 Overzicht interessegebied; Locaties modellagen per JARKUS-raai op basis van 2005
- 7.3 Detail interessegebied met achtergrond



- 7.4a Overzicht en detail interessegebied in lokaal systeem; Situatie medio 1990 (1991)
- 7.4b Overzicht en detail interessegebied in lokaal systeem; Situatie medio 2000 (2001)
- 7.4c Overzicht en detail interessegebied in lokaal systeem; Situatie medio 2005 (2006)
- 7.5 Gehanteerd duinniveau Z0-niveau als functie van x-positie
- 7.6 Positie strekdammen en dijken
- 7.7 Overzicht van uitgevoerd kustlijnonderhoud in de periode 1991 tot 2006
- 7.8 Voorbeeld afregeling dwarstransport over NAP-2 m dieptelijn; Aanwezige afstand en schematisatie afstand Y2- en Y1-laag en resulterend initieel dwarstransport door NAP-2m contour
- 7.9 Vergelijking tussen uitgevoerd en voorspeld kustlijnonderhoud
- 7.10 Voorbeeld 'live' resultaat PONTOS-berekening

- 8.1 Overzicht referentiesituatie
- 8.2 Overzicht versterkingsvarianten; Combinatie van versterkingsalternatieven en trajecten

- 9.1 Problematiek kustverdediging Waterdunen-trace; Overzichtsfoto lokale situatie
- 9.2 Idem; Overzicht aanwezige dwarsprofielen
- 9.3 Idem; Karakteristiek profiel met landwaartse aanvulling op NAP+11 m; Afslag tijdens maatgevende condities (huidige situatie)
- 9.4 Idem; Afslag huidige situatie voor verschillende condities
- 9.5 Idem; Afslag normconditie conform middenscenario ($h +0,60$ m/eeuw)
- 9.6 Idem; Afslag normconditie conform maximumscenario ($h +0,85$ m/eeuw + $0,40$ m; $H_s +5\%$; $T_p +2,5\%$)
- 9.7 Idem; Profielontwikkeling volgens DurosTa-model bij vaste (maximale) stormcondities gedurende 5 uur
- 9.8 Idem; Profielontwikkeling volgens DurosTa-model bij variërend stormvloedverloop gedurende 32 uur
- 9.9 Idem; Tijdsontwikkeling maatgevende afslagpunt zonder en met netto BKL-onderhoud
- 9.10 Overzicht positie BKL (2001) en MKL-posities sinds 2001 als functie van de positie langs de RSP-lijn
- 9.11 Verschil MKL-positie ten opzichte van BKL-positie (2001) voor de tijdsperiode 2001 t/m 2006 als functie van de positie langs de RSP-lijn
- 9.12 Overzicht jaarlijkse mutatie MKL-waarde voor alle jaren sinds 1990 (inclusief het effect van uitgevoerde suppleties) als functie van de positie langs de RSP-lijn
- 9.13 Overzicht jaarlijkse mutatie MKL-waarde voor de jaren 2000 t/m 2006 (inclusief het effect van uitgevoerde suppleties) als functie van de positie langs de RSP-lijn
- 9.14 Ontwikkeling relatieve MKL-positie als functie van de tijd Voor alle raaien binnen kustvak Cadzand-Bad; Effect suppleties 2001 en 2005
- 9.15 Ontwikkeling MKL-trend als functie van de tijd Voor alle raaien binnen kustvak Cadzand-Bad; Effect suppleties 2001 en 2005
- 9.16 Voorbeeld ontwikkeling MKL bij zeewaartse kustuitbouw bij robuuste zeewaartse verplaatsing BKL over versterkingsafstand; Effect al dan niet (gelijk) aanbrengen van een slijtlaag
- 9.17 Voorbeeld ontwikkeling MKL bij zeewaartse kustuitbouw bij verschillende zeewaartse verplaatsing BKL over versterkingsafstand; Effect robuuste en geleidelijke BKL-verschuiving



- 9.18 Resultaat duinafslagberekeningen bij zeewaarste versterking; Details situatie voor 50 en 100 jaar
- 9.19 Ontwikkeling MKL als functie van de tijd met 2006 als mager jaar
- 9.20 Resultaat duinafslagberekeningen met DurosTA-model; Vergelijking effect instabiele en stabiel dijkconstructie; Locatie randvoorwaarde bepaling golfaanval dijkconstructie
- 9.21 Verloop diepwatercondities en lokale golfhoogte; Situatie met instabiel en stabiel dijktaalud
- 9.22 Verloop maatgevende golfhoogte voor verschillende uitbouwwaarden, variërend van geen (0 m) tot 80 m uitbouw
- 9.23 Vergelijking afslagprofielen voor verschillende uitbouwwaarden
- 9.24 Maximale golfaanval op dijk als functie van uitbouwwaarde Inclusief overgang niet belaste dijk
- 9.25 Vergelijking aanlegopties "Dijk als duin" versus "Duin voor dijk"
- 9.26 Benodigd damniveau per aanlegoptie
- 9.27 Resultaat duinafslagberekeningen bij zeewaarste versterking; Details situatie voor 50 en 100 jaar
- 9.28 Resultaat duinafslagberekeningen bij zeewaarste versterking; Details situatie voor 50 en 100 jaar
- 9.29 Ontwikkeling MKL als functie van de tijd met 2005 als relatief mager jaar voor beide locaties
- 9.30 Resultaat duinafslagberekeningen met DurosTA-model voor verschillende uitbouwwaarden
- 9.31 Resultaat duinafslagberekeningen met DurosTA-model voor verschillende uitbouwwaarden
- 9.32 Verloop maatgevende golfhoogte voor verschillende uitbouwwaarden, variërend van geen (0 m) tot 45 m uitbouw
- 9.33 Maximale golfaanval op dijk als functie van uitbouwwaarde inclusief overgang niet belaste dijk
- 9.34 Resultaat duinafslagberekeningen robuuste dijk als duin; Overzicht situatie voor 50 en 100 jaar; Met 20 m extra brestoeslag aan achterzijde
- 9.35 Resultaat duinafslagberekeningen robuuste dijk als duin; Details situatie voor 50 en 100 jaar; Met 20 m extra brestoeslag aan achterzijde
- 9.36 Ontwikkeling MKL als functie van de tijd; Met 2000 als mager jaar

**) Alle figuren zijn separaat toegevoegd.*

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Als onderdeel van de studie die gericht is op de versterking van de Zwakke Schakel West Zeeuwsch-Vlaanderen, is gekeken naar het gedrag van de waterkering onder zowel de meer gemiddelde dagelijkse condities als de extreme ontwerpomstandigheden. Het gedrag onder ontwerpomstandigheden is daarbij in het bijzonder relevant voor de veiligheid van de zachte waterkering als geheel. Uit dit gedrag kan voor de niet voldoende robuuste dwarsprofielen de omvang van de benodigde versterking worden bepaald. Indien er sprake is van een in zand uitgevoerde, zachte zeewaartse versterking speelt ook de morfologie een rol. De suppletie bevindt zich dan immers onder de invloed van de dagelijkse golf- en getijdewerking. Bij een landwaartse versterking is dit natuurlijk niet het geval. In het eerste geval zijn duinveiligheid en morfologie dus direct met elkaar verbonden.

Een en ander is zeer schematisch weergegeven in figuur 1.1.

In de bovenste afbeelding (figuur 1.1a) is de algemene samenhang tussen de tijd en ruimteschalen weergegeven. De veiligheidsberekeningen spelen zich af op een korte tijd- (individuele storm) en ruimteschaal (locale beschouwingen op raainiveau).

De morfologische beschouwingen hebben betrekking op meer langjarige ontwikkelingen en daarmee ook op grotere ruimteschalen. De aandacht gaat daarbij in plaats van dwarsprofielen dus meer uit naar de ontwikkeling van individuele kustsecties of zelfs de gehele westkust van Zeeuwsch-Vlaanderen.

De onderste afbeelding (figuur 1.1b) geeft een algemene relatie tussen het versterkingsniveau en de veiligheid van de zachte waterkering schematisch weer. In de huidige situatie (zonder versterking) is hierin de veiligheid van de waterkering volgens de vigerende inzichten op termijn plaatselijk minder dan vereist; het is immers een zwakke schakel. Uitvoering van een versterking leidt tot een voldoende toename van het veiligheidsniveau.

Door de uitvoering van de veiligheidsberekeningen wordt inzicht verkregen in de versterkingsomvang welke nodig is voor het realiseren van een op termijn juiste veilige waterkering. Feitelijk betreft dit dus het eerste deel van de studie met de zogenaamde 'veiligheidsopgave' als resultaat. Bij uitvoering van deze versterking ontstaat een, voor de gehanteerde planperiode, marginaal veilige waterkering. De waterkering dient echter, in het bijzonder bij een in zand uitgevoerde zeewaartse versterking, zodanig robuust te worden aangelegd dat de minimaal vereiste veiligheid daadwerkelijk altijd aanwezig is. Hiertoe kan bij een zeewaartse kustversterking een zekere overmaat aan versterking in de vorm van een slijtlaag worden aangebracht. De grootte van deze extra versterking volgt uit het tweede onderdeel van de studie: de morfologische uitwerking. Dit geeft daarmee richting aan de daadwerkelijk aan te brengen versterkingen.

1.2 Doel en aanpak

Het doel van dit deel van de studie betreft dus zowel het uitwerken van de veiligheidsaspecten als de morfologie.

Veiligheid van de waterkering

Binnen dit deel van de studie wordt de omvang van de lokale benodigde versterking op het niveau van individuele dwarsprofielen uitgewerkt. Hierbij zijn natuurlijk de hiertoe gebruikte randvoorwaarden en uitgangspunten van primair belang. Bij de uitwerking is onderscheid gemaakt tussen een globale dimensionering voor het gehele kustvak en een meer gedetailleerde uitwerking voor een aantal geselecteerde dwarsprofielen.

In de globale dimensionering wordt gekeken naar de ontwikkeling van het dwarsprofiel (onder invloed van zeespiegel-stijging en kustlijnonderhoud) in relatie tot de ontwikkeling van de maatgevende belasting. Hieruit komt dus naar voren voor welke locaties op welke termijn de waterkering niet meer aan de vigerende eisen voldoet en wat daarbij de omvang van de dan benodigde versterking is.

In een daaropvolgende uitwerking wordt de (voor een gekozen planperiode en versterkingsrichting) benodigde versterking nader gekwantificeerd. De hiertoe gebruikte raaien zijn grafisch weergegeven in figuur 2.1.

Morfologie

Binnen dit tweede deel van de studie komt de morfologische ontwikkeling van de kustzone aan de orde. In eerste instantie gaat dit om een meer grootschalige beschouwing met een focus op de primair van belang zijnde gebieden. Voor de kustvakken waar er sprake is een zeewaartse variant is vervolgens aan de hand van een gedetailleerde analyse van de beschikbare gegevens een nadere analyse van het morfologische systeem uitgevoerd.

Tenslotte is met behulp van de inzet van een morfologisch rekenmodel de nadere dimensionering van de zeewaartse versterking bij het kustdeel oostelijk van Cadzand-Bad ter hand genomen.

1.3 Opzet van het rapport

De opzet van het rapport is geheel in lijn met de eerder beschreven aanpak. Het eerste deel heeft daarbij betrekking op de veiligheidsaspecten; het tweede deel gaat in op de morfologie.

In hoofdstuk 2 wordt eerst uitgebreid ingegaan op de bij de veiligheidsberekeningen gebruikte uitgangspunten. Hierbij wordt niet alleen aandacht besteed aan de hydraulische randvoorwaarden, de gebruikte rekenmethodiek en het gebruikte DUINAFSLAG-model, maar ook aan het voor de berekeningen te gebruiken dwarsprofiel. Dit laatste niet alleen voor wat betreft het te gebruiken jaar (het jaar van de profielopname), maar ook voor de wijze waarop het dwarsprofiel wordt geacht te reageren op de combinatie van zeespiegelstijging en kustlijnonderhoud. Ook komt de interactie met de reeds aanwezige constructies aan de orde.

Hoofdstuk 3 beschrijft de resultaten van de verkennende berekeningen zoals die zijn uitgevoerd voor alle 79 dwarsprofielen langs de westkust van Zeeuwsch-Vlaanderen, van km raai 0.11 bij Breskens tot km raai 14.87 bij het Zwin (zie ook figuur 2.1 en tabel 2.1). Hierbij is naast de huidige situatie ook het resultaat gegeven voor toekomstige situaties over 50, 100 en 200 jaar, dit zowel voor een landwaartse als een zeewaartse versterking. Deze uitwerking geeft een beeld van de benodigde versterkingsbehoefte langs de kust. Omdat er hierbij zowel de landwaartse als de zeewaartse oplossingen worden beschouwd kunnen deze resultaten direct worden gebruikt voor de selectie van de voorkeursoplossingsrichting.



Een meer gedetailleerde uitwerking van de benodigde versterkingen is gegeven in hoofdstuk 4. Hierin is voor een aantal geselecteerde profielen de benodigde versterking verder uitgedetailleerd. Hierbij is de aandacht met name uitgegaan naar de voor de geselecteerde combinatie van versterkingsrichting (landwaarts of zeewaarts) en planperiode (50, 100 of 200 jaar).

Relevante aspecten met betrekking tot de morfologie van de westkust van Zeeuwsch-Vlaanderen worden besproken in hoofdstuk 5 van deze rapportage. Mede op basis hiervan wordt invulling gegeven aan de benodigde modellering van de zeewaartse versterkingen bij Cadzand-Bad, Groede en Breskens.

Alvorens echter over te gaan tot het gebruik van een morfologisch model wordt in hoofdstuk 6 per relevant deelgebied uitgebreid gekeken naar het morfologische gedrag binnen het kustvak. De resultaten van deze beschouwingen zijn daarbij reeds sturend voor de selectie van de uiteindelijke oplossingsrichting. Het resultaat zal bovendien als basis dienen voor de nadere meer gedetailleerde morfologische uitwerking.

De uitgangspunten voor de morfologische modellering komen uitgebreider aan de orde in hoofdstuk 7. Hierbij is onder andere ingegaan op de hydraulische condities en de wijze waarop deze in de modellering zijn meegenomen. Natuurlijk zal hierbij ook de nodige aandacht worden gegeven aan een beschrijving van het gebruikte rekenmodel, het zogenaamde PONTOS-model. Daar waar er bij het voor de duinafslagberekeningen gebruik kon worden gemaakt van een afgeregeld en direct toepasbaar DUINAFLAG-model, is dit natuurlijk niet het geval voor het morfologische model PONTOS. De wijze waarop dit model voor het probleemgebied is afgeregeld komt ook in dit hoofdstuk aan de orde. Mede op basis hiervan wordt ook een beeld gekregen van de betrouwbaarheid en bruikbaarheid van het morfologische model, iets wat natuurlijk van groot belang is bij de interpretatie van de verkregen rekenresultaten.

De voor de versterking relevante modelresultaten zijn in hoofdstuk 8 bijeengebracht. Hierbij gaat de aandacht met name uit naar de omvang van het benodigde kustonderhoud en de wijze waarop dit onderhoud afhankelijk is van het al dan niet aanbrengen van ondersteunende constructies zoals dammen.

In hoofdstuk 9 worden de resultaten van de korte en de lange termijn uitwerkingen samengebracht, resulterend in een definitief ontwerp (het VKA). Ook zijn in dit hoofdstuk de resultaten van speciaal ten behoeve van de detaillering uitgevoerde deelstudies samengebracht. Deze zijn deels te zien als aanpassingen van eerdere uitwerkingen.

Tabel 1.1 geeft een samenvattend overzicht van de structuur van het rapport.



Hoofdstuk	Onderdeel	Onderwerp	Opmerkingen
1	Inleiding		Algemene aspecten en rapportopzet
2	Veiligheid	Uitgangspunten	
3		Globale berekeningen	T.b.v. MER
4		Detailberekeningen	T.b.v. versterkingsplan
5	Morfologie	Globale morfologie	
6		Detailbeschouwingen	
7		Modeltoepassing	
8		Detailberekeningen	
9	Integratie		Combinatie van resultaten hoofdstuk 4 en 8 inclusief de speciaal t.b.v. versterkingsplan uitgevoerde deelstudies

Tabel 1.1: Overzicht geplande structuur achtergrondrapportage duinveiligheid en morfologie.

1.4 Totstandkoming

De studie werd uitgevoerd in de periode april 2006 tot en met juni 2007 door dr. ir. H.J. Steetzel, met medewerking van ir. C.E. Jacobs en dr. J. Cleveringa (allen Alkyon). Eerstgenoemde is ook verantwoordelijk voor de voorliggende rapportage, alsmede voor de in de aanloop naar deze rapportage geproduceerde onderliggende memo's. Ir. C.E. Jacobs was verantwoordelijk voor de uitgevoerde duinafslagberekeningen. Dr. J. Cleveringa heeft bijgedragen aan met name de morfologische beschrijving van het interessegebied, dit mede gebaseerd op een grote hoeveelheid aan onderliggende literatuur.

Samenhangend document in plaats van separate memo's

In eerste instantie was het de bedoeling de resultaten van de verschillende onderdelen van deze studie in de vorm van separate memo's vast te leggen. In een later stadium is er voor gekozen om een en ander te bundelen in een enkel integraal achtergrond-document met het voorliggende rapport als resultaat.

Overleg met opdrachtgever

De (tussen)resultaten van de studie zijn besproken met een door de opdrachtgever samengestelde projectgroep.

Meer inhoudelijke discussies vonden daarbij plaats in de werkgroep Hydraulica en Morfologie ('wg H&M-WZV'). Hierin hadden initieel zitting: Lies Dekker (namens de opdrachtgever), Piet Roelse (oud RIKZ-er), Gert-Jan Liek (RWS/RIKZ), Adri Provoost, Ernst Jonker en Aloys Sponselee (Waterschap Zeeuws-Vlaanderen). In de loop van het project is met name de participatie namens RWS verschillende keren gewijzigd. Na Gert-Jan Liek participeerden Marien Boers, Gertjan Nederbragt en uiteindelijk Quirijn Lodder.

2 Uitgangspunten duinveiligheidsberekeningen

2.1 Inleiding

In het volgende zijn de voor het kwantificeren van de benodigde versterkingen gehanteerde uitgangspunten samengebracht.

Daarbij komen respectievelijk aan de orde:

- Het gebruikte rekenmodel;
- De te beschouwen scenario's;
- De hydraulische randvoorwaarden in zowel de huidige als de toekomstige situatie;
- De te gebruiken dwarsprofiel informatie;
- De effecten van gecombineerde zeespiegelstijging en kustlijnonderhoud;
- De interactie met constructies^{*)}.

Algemeen uitgangspunt bij de (duinafslag)berekeningen is overigens dat de versterking in de vorm van een zandaanvulling wordt uitgevoerd. Het versterkte dwarsprofiel wordt daarbij dus als een duin beschouwt. Het positieve effect van de aanwezigheid van eventuele dijkbekleding wordt daarbij dus niet in rekening gebracht. Met een negatief effect wordt wel rekening gehouden.

In tabel 2.1 en figuur 2.1 is een overzicht gegeven van de gehanteerde raailocaties. In het totaal gaat het daarbij om 79 verschillende raaien.

2.2 Gebruikt rekenmodel

Voor de verschillende duinafslagberekeningen is gebruik van het zogenaamde Alkyon DUINAFLAG-model. Dit model is gebaseerd op het wettelijk voorgeschreven TAW-1984 model. Binnen het gebruikte rekenmodel is een procedure opgenomen om het effect van de langere golfperiode te verrekenen door het rekenen met een afwijkende, kleinere korrel diameter. Deze wordt zodanig gekozen dat de hoeveelheid duinafslag boven het rekenpeil met het gewenste, voorgeschreven percentage toeneemt^{**)}. Het DUINAFLAG-model is meer geschikt voor het uitvoeren van grote series berekeningen.

Voor de in hoofdstuk 4 beschreven detailberekeningen is gebruik gemaakt van de Alkyon/ENW-onderzoeksversie van het duinafslagmodel. Hierbij is de reguliere toeslag T op de basisafslag A' (zijnde 25% van de basisafslag vermeerderd met $20 \text{ m}^3/\text{m}^1$) zodanig aangepast dat het vereiste opslagpercentage voor een langere golfperiode (voor Zeeland 35 %; zie verderop) impliciet onderdeel uitmaakt van deze (aangepaste) toeslag. De hierbij relevante getalswaarden zijn samengebracht in tabel 2.2.

Situatie	Basisafslag (= A')	Toeslag (= T)	Totale afslag (= $A' + T$)
Conform TAW-84	A'	$0,25 A' + 20$	$1,25 A' + 20$
Met 35 % opslag	A'	$0,6875 A' + 27$	$1,35 (1,25 A' + 20)$

Tabel 2.2: Overzicht samenstelling bestanddelen afslagvolumes boven rekenpeil.

^{*)} Inclusief de formulering van de zogenaamde 'brestoeslag'

^{**)} Deze correctie op de hoeveelheid duinafslag is nodig om het effect van een langere golfperiode te kwantificeren

Beide modellen leveren overigens per definitie vergelijkbare resultaten ten aanzien van de hoeveelheid duinafslag en de mate van teruggang van het duinfront.

In beide gevallen is de basisberekening (met de basisafslag A^*) het startpunt. De gezochte eindsituatie heeft in beide gevallen een totale afslag welke gelijk is aan de 1,35 maal de totale afslag in dit basisgeval ($= 1,25 A^* + 20 \text{ m}^3/\text{m}^1$) of wel $1,35 (1,25 A^* + 20) \text{ m}^3/\text{m}^1$.

In het eerste geval wordt deze bereikt door het zoeken naar een aangepast basisgeval met een afwijkende, kleinere korreldiameter. In het tweede geval wordt deze bereikt door het direct verrekenen van de extra benodigde correctie in de toeslag. In plaats van de factor 0,25 wordt deze dan $1,35 \cdot 1,25 - 1 = 1,6875 - 1 = 0,6875$.

Uiteindelijk liggen vallen de afslagpunten samen. Het afslagprofiel in het eerste geval (met de kleinere korreldiameter) is echter minder steil en daardoor iets langer.

In figuur 2.2 is een en ander aan de hand van een voorbeeld weergegeven. In het eerste geval is voor het verkrijgen van de gewenste extra afslag gebruik gemaakt van een rekenwaarde voor de korreldiameter van $167 \mu\text{m}$ in plaats van $200 \mu\text{m}$.

2.3 Beschouwde scenario's

Binnen deze studie is sprake van gecombineerde scenario's. Het gaat daarbij om een combinatie van landwaartse of zeewaartse versterkingen met een bepaalde zichtperiode. In tabel 2.3 is hiervan een overzicht gegeven.

Versterkingsrichting	Zichtperiode / TAW/ENW-scenario			
	0 jaar n.v.t.	50 jaar midden	100 jaar midden	200 jaar maximum
Landwaarts	X	X	X	X
Zeewaarts	X	X	X	X

Tabel 2.3: Overzicht gehanteerde combinaties versterkingsrichting en zichtperiode.

In de tabel is ook het bijbehorende TAW/ENW scenario gegeven.

Voor de 50 en 100 jaar heeft deze betrekking op het zogenaamde middenscenario. Voor de 200 jaar wordt het maximumscenario gehanteerd. Bij elk TAW/ENW-scenario behoort een bepaalde mutatie van de hydraulische randvoorwaarden (zie volgende paragraaf). Overigens moet worden opgemerkt dat de berekeningen voor de huidige situatie met name gericht zijn op het opsporen van de zwakke plekken in de waterkering. In het volgende komen respectievelijk de scenario-afhankelijke belasting en de sterkte van het dwarsprofiel aan de orde.

2.4 Hydraulische randvoorwaarden (belasting)

2.4.1 Huidige situatie

De randvoorwaarden voor de huidige situatie zijn overeenkomstig de in de RWS-notitie DWW-2003-040 opgenomen getalswaarden. Deze komen overeen met de ook in het beheerdersoordeel gehanteerde waarden.

De te gebruiken waarden van het rekenpeil, de significante golfhoogte en de piekperiode variëren langs de kust. Tabel 2.4 geeft een overzicht van het bereik van deze parameters.

Parameter	Range	Opmerkingen
Rekenpeil	NAP+5,4 tot +5,6 m	Oplopend in noordelijke richting
Golfhoogte	3,0 tot 5,8 m	Oplopend in zuidelijke richting
Golfperiode	11,4 s	

Tabel 2.4: Overzicht bereik parameterwaarden voor huidige situatie.

Het rekenpeil ligt het meest hoog bij Breskens en neemt in de richting van Cadzand enigszins af. Voor de golfhoogte geldt het omgekeerde. De laagste waarden zijn aanwezig bij Breskens, de hoogste bij Cadzand.

In de separaat toegevoegde tabel 2.5 is per individuele locatie de gehanteerde waarde van het rekenpeil, de golfhoogte en de golfperiode gegeven. De langsvariatie van het rekenpeil en de golfhoogte zijn grafisch weergegeven in figuur 2.3.

Verwerking effect langere golfperiode

Teneinde het effect van een langere golfperiode in rekening te brengen, moet er rekening worden gehouden met 35% opslag op de reguliere omvang van de hoeveelheid duinafslag boven rekenpeil. Deze pragmatische werkwijze is nodig omdat het reguliere duinafslagmodel conform [TAW, 1984] geen rekening kan houden met het effect van een andere, langere golfperiode. De wijze waarop hiermee rekening wordt gehouden is reeds eerder aangegeven (zie paragraaf 2.2).

2.4.2 Toekomstige situaties

De hydraulische randvoorwaarden voor de toekomstige situaties, voor 50, 100 en 200 jaar kunnen worden gezien als een mutatie op de eerder besproken huidige randvoorwaarden. Meer in detail gaat het daarbij om een aanpassing van de maatgevende waterstand (het rekenpeil) en de golfaanval (de golfhoogte en de periode). Een overzicht van de hierbij relevante mutaties is gegeven in tabel 2.6.

Parameter	Zichtperiode / TAW/ENW-scenario			
	0 jaar	50 jaar	100 jaar	200 jaar
	n.v.t.	midden	midden	maximum
Rekenpeil		+0,30 / 0,35 m	+0,65 / 0,70 m	+2,20 / 2,30 m
Golfhoogte	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+5 %
Golfperiode		n.v.t.	n.v.t.	+0,5 s

Tabel 2.6: Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden toekomstige situaties.

De mutatie in het rekenpeil is gelijk aan de stijging van de gemiddelde zeewaterstand. In het maximum scenario komt daar nog een extra waterstandsmutatie van 0,40 m bovenop.

Voor de situatie over 200 jaar (met het maximum TAW/ENW-scenario) moet hieraan gekoppeld ook rekening worden gehouden met een 5% grotere golfhoogte. De golfhoogte neemt daarbij dus met 0,15 tot 0,30 m toe.

In de separaat toegevoegde tabel 2.7 is een overzicht gegeven van de per zichtperiode gehanteerde hydraulische randvoorwaarden. Het gehanteerde grafische verloop is toegevoegd in figuur 2.3.

De zeespiegelstijging heeft ook een effect op het aanwezige dwarsprofiel. Dit komt in de volgende paragraaf aan de orde.

2.5 Dwarsprofiel (sterkte)

2.5.1 Algemeen

Het dwarsprofiel is voor wat betreft de zeewaartse sectie per opnamejaar enigszins verschillend. Het gebruik van een specifiek jaar heeft daarmee dus ook impliciet effect op het resultaat van een duinafslagberekening. Afhankelijk van de 'volheid' van het profiel wordt immers een meer of minder landwaarts gelegen positie van het afslagpunt gevonden.

Feitelijk zijn daarbij voor duinafslagberekeningen twee situaties van belang, namelijk:

- De meest ongunstige situatie waarbij het dwarsprofiel relatief 'mager' is (het zogenaamde BKL-jaar) en
- De huidige situatie met het thans aanwezige dwarsprofiel.

Het gebruik van een van deze twee uitgangssituaties hangt samen met het doel van de berekening. Ook hierbij zijn er twee mogelijkheden, te weten:

- Het verkennen van de toekomstige versterkingsbehoefte en
- De kwantificering van een thans aan te brengen versterking.

2.5.2 Opnamejaar

De relevante combinaties van profiel (opnamejaar) en berekeningsdoel zijn samengebracht in tabel 2.8.

Profiel opnamejaar	Berekeningsdoel	
	Versterkingsbehoefte	Versterkingsontwerp
BKL-jaar	Alle versterkingen	Landwaarts
Recent jaar	n.v.t.	Zeewaarts

Tabel 2.8: Overzicht relevante combinaties profiel/opnamejaar en berekeningsdoel.

Een toelichting op de drie relevante combinaties is gegeven in het volgende.

BKL-jaar t.b.v. toekomstige versterkingsbehoefte

Indien de toekomstige veiligheidsituatie van de waterkering en de noodzaak tot eventuele versterking in kaart moet worden, moet worden uitgegaan van de meest ongunstige te verwachten situatie.

Feitelijk is dit een dwarsprofiel waarvoor de momentane ligging van de kustlijn (de zogenaamde MKL) overeenstemt met de positie van de basiskustlijn (de zogenaamde BKL). Een onderschrijding van deze waarde wordt per definitie immers door de uitvoering van kustlijnsuppleties tenietgedaan.

Feitelijk is dit de insteek van de in hoofdstuk 3 gepresenteerde berekeningen.

De selectie van het zogenaamde BKL-jaar kan plaats vinden door de MKL van meerdere jaren (sinds 1990) te vergelijken met de BKL. In het kader van het beheerdersoordeel heeft deze uitwerking reeds plaatsgevonden [WSZV, 2005]. De BKL-jaren kunnen dan ook worden ontleend aan kolom 4 van bijlage 3BB van het beheerdersoordeel. De hierin opgenomen BKL-jaren variëren van 1990 (voor km raai 14.270) tot 2003 (voor km raai 13.725).

BKL-jaar t.b.v. kwantificering landwaartse versterking

Voor het bepalen van de benodigde landwaartse versterking dient te worden uitgegaan van een minimaal gegarandeerd dwarsprofiel. Feitelijk geldt hierbij dus hetzelfde uitgangspunt als in het vorige geval.

Meest recent jaar t.b.v. kwantificering zeewaartse versterking

Indien daarentegen er echter een daadwerkelijk zeewaarts versterkingsplan moet worden gemaakt speelt het huidige (relatief vollere) profiel natuurlijk een rol. Een deel van het aan te brengen zand ligt er dan immers al. Dit soort berekeningen komt in hoofdstuk 4 aan de orde.

In het geval van een zeewaartse versterking heeft de exacte profielligging aan de zeewaartse zijde geen invloed op de geometrie van de aan te brengen versterking. De positie van de buitenkruinrand van de zeewaartse uitbouw (zoals deze volgt uit een duinafslagberekening) hangt immers alleen af van de vorm van het duin aan landwaartse zijde en de geometrie van de versterking.

De profielvorm van het zeewaartse deel van het profiel heeft natuurlijk wel invloed op de omvang van het de aan te brengen volume. Teneinde deze correct te bepalen is voor dergelijke gevallen dan ook gebruik gemaakt van het meest recente dwarsprofiel (opnamejaar 2005).

2.5.3 Korrelmateriaal

De mate van duinafslag en daarmee ook de omvang van de benodigde versterkingen hangt mede af van het aanwezig veronderstelde duinmateriaal.

Ten behoeve van de ENW/TAW-84-leidraad is een overzicht gegeven van de in het duin aanwezige korreldiameter. Het relevante deel van dit overzicht is opgenomen in tabel 2.10.

Locatie	Gemiddeld [μm]	Spreiding [μm]	Rekenwaarde [μm]	Opmerkingen
Km 0.518 (3)	218	31	196	
Km 4.869 (24)	188	9	186	
Km 8.770 (44)	212	24	198	
Km 12.620 (64)	216	13	212	
Km 14.670 (78)	258	13	255	Nabij Zwin

Tabel 2.10: Overzicht korreldiameter duinmateriaal volgens ENW/TAW-1984.

De per locatie gehanteerde waarden zijn gebaseerd op de in bijlage 2 van het beheerdersoordeel gegeven getalswaarden. Deze zijn toegevoegd in tabel 2.9.

Uit de tabel blijkt overigens dat de rekenwaarde van het aanwezige duinmateriaal ongeveer 200 μm bedraagt. Alleen bij het Zwin is er sprake van duidelijk grofkorreliger materiaal.

Bij het uitvoeren van een versterking kan natuurlijk gebruik worden gemaakt van afwijkend korrelmateriaal. Het gebruik van grover materiaal heeft daarbij het voordeel dat er vanwege de hiermee samenhangende grotere stabiliteit sprake kan zijn van een relatief beperktere omvang van de benodigde aanvullingen.

Vanuit tal van andere overwegingen wordt echter veelal de voorkeur gegeven aan het toepassen van min of meer gebiedseigen materiaal. Daarom zal er bij de uitvoering van

de gedetailleerde afslagberekeningen van hoofdstuk 4 dan ook gebruik worden gemaakt van een aanvulling met een rekenwaarde van de korreldiameter van 200 μm . Voor de berekeningen van hoofdstuk 3 is gebruik gemaakt van de waarden uit tabel 2.9.

2.5.4 Aangepaste profielvorm a.g.v. zeespiegelstijging

Door zeespiegelstijging zal er sprake zijn van een geleidelijk mee omhoog verplaatsen van tenminste het natte deel van het kustprofiel. De hiermee samenhangende mutaties zijn samengebracht in tabel 2.11.

Zichtperiode	Zeespiegelstijging	Profielaanpassing	Opmerkingen
0	n.v.t.	n.v.t.	Huidige situatie
50 jaar	+0,30 m	+0,30 m voor < NAP+3 m	
100 jaar	+0,60 m	+0,60 m voor < NAP+3 m	
200 jaar	+1,70 m	+1,70 m voor < NAP+3 m	

Tabel 2.11: Overzicht reguliere profielaanpassing als functie van zichtperiode.

Een en ander hangt ook samen met het vigerende kustbeleid. Op deze samenhang wordt in de volgende paragraaf uitgebreider ingegaan.

2.6 Gecombineerde zeespiegelstijging en kustonderhoud

2.6.1 Normale gesuppleerde strandprofielen

In het geval van een normaal strandprofiel is er altijd sprake van dynamische evenwichtsvorm van het gedeelte van de profiel rond de waterlijn. Dit geldt in ieder geval voor het profiel tussen het duinfront en de brekerlijn (zie figuur 2.4a). Deze profielvorm zal zich ook instellen bij een stijgende zeespiegelstand. Uit balans-overwegingen zal hierbij echter sprake zijn van een landwaartse verplaatsing van de waterlijn. Een en ander wordt ook wel aangeduid met het zogenaamde 'Bruun-effect' (zie figuur 2.4b).

Het gevolg van deze migratie is echter ook dat de positie van de momentane kustlijn, de MKL, zich in landwaartse richting zal verplaatsen. Door uitvoering van kustlijnsuppleties zal deze migratie echter worden tegengegaan. De consequentie hiervan is dat de MKL op de plaats blijft en dus het natte deel van het dwarsprofiel (landwaarts van de duinvoet) zich in verticale richting verplaatst (zie figuur 2.4c).

De ophoging van dit deel van het dwarsprofiel is daarmee gelijk aan de verhoging van de gemiddelde zeewaterstand conform de in tabel 2.11 gegeven getalswaarden.

Deze uitwerking heeft dus betrekking op de standaard situatie met een normaal gesuppleerd dwarsprofiel. Er zijn echter ook tal van andere situaties denkbaar.

2.6.2 Afwijkende situaties

De eerder beschreven mutatie doet zich alleen voor in het geval dat er sprake is van een volledig morfologisch actief en mobiel dwarsprofiel in combinatie met kustlijnonderhoud. Dit is echter niet het geval als er sprake is van:

- Een normaal kustprofiel zonder kustlijnonderhoud;
- Een voor een dijk gelegen strand;
- Een kustprofiel met een steile vooroever en een daarbij behorende niet of slecht erodeerbare geulrand.

In het eerste geval treedt alleen het eerder genoemde 'Bruun-effect' op en is er dus sprake van een landwaartse verplaatsing van de waterlijn. Omdat er voor alle duinprofielen sprake is van potentieel kustlijnonderhoud komt deze situatie feitelijk niet voor.

In het geval van een dijk met een droogvallend strand is ook een BKL vastgesteld. Zeespiegelstijging zal in deze gevallen potentieel leiden tot het verdwijnen van het strand omdat de benodigde toevoer van zand vanuit het bovenste deel van het kustprofiel door de aanwezigheid van de dijk niet mogelijk is. Door kustonderhoud zal de hoeveelheid materiaal in de BKL-laag echter op niveau worden gehouden. Het overgrote deel van deze aanvullingen zal echter in het onderste deel van het profiel terechtkomen. Een en ander betekent dus dat er in deze gevallen geen rekening moet worden gehouden met een meestijgend (bovenste deel van het) dwarsprofiel.

In het laatste geval is er immers geen sprake van een volledig mobiele profielvorm. Onder invloed van het 'Bruun-effect' zal er sprake zijn van een zich landwaarts verplaatsende waterlijn. Door uitvoering van kustlijnsuppleties zal met name het onderste deel van het dwarsprofiel (beneden de stabiele geulrand) worden gevoed. Een en ander leidt dus niet tot een opwaartse verplaatsing van de waterlijn. Ook hierbij dient dus geen rekening te worden gehouden met een meestijgend strand.

2.6.3 Samenvatting

In tabel 2.12 is een samenvattend overzicht gegeven van de verschillende vormen van profielaanpassing.

Situatie	Aanpassing strand	Opmerkingen
Normaal dwarsprofiel	Regulier	Conform tabel 2.6
Strand voor dijk	Geen aanpassing	
Dwarsprofiel (duin) met steile vooroever	Landwaartse verplaatsing waterlijn	

Tabel 2.12: Overzicht mogelijke profielaanpassingen.

Een en ander is in figuur 2.4 schematisch weergegeven.

2.6.4 Slotopmerkingen

Overigens moet worden opgemerkt dat de het al dan niet meestijgen van het strand feitelijk afhankelijk zal blijken te zijn van de geselecteerde oplossingsrichting. Bij de aanwezigheid van een dijk in combinatie met een landwaartse versterking is er sprake van een niet meestijgende bodem.

Bij een zeewaartse versterking zal er daarentegen wel rekening moeten worden gehouden met een geleidelijke ophoging van het strand.

Dit laatste is echter alleen van belang bij het kwantificeren van een op termijn benodigde zeewaartse versterking. Indien per direct wordt overgegaan tot de uitvoering ervan speelt de toekomstige bodemstijging (behalve met het oog op het benodigde onderhoud) geen rol.

2.7 Interactie met reeds aanwezige dijk

2.7.1 Algemeen

In de hier beschreven gevallen is steeds uitgegaan van een volledig zandige waterkering. In een aantal gevallen is er echter ook sprake van het aanwezig zijn van een harde kering (in de vorm van een dijkconstructie) welke onder de maatgevende condities in

voorkomende gevallen geacht wordt te bezwijken. Het dijkprofiel voldoet immers op enige termijn niet meer (is dan ook een zwakke schakel!).

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen een tweetal situaties, namelijk:

- Een dijk met een *voorliggend* duin als zeewaartse versterking (dijk-achter-duin);
- Een dijk met een *achterliggend* duin als landwaartse versterking (duin-achter-dijk).

In het volgende wordt op beide situaties nader ingegaan.

2.7.2 Dijk-achter-duin (zeewaartse versterking)

In dit geval is sprake van een zeewaartse versterking waarbij, in het meest extreme geval, veiligheidshalve de aanwezige niet stabiele dijk als zandig kan worden beschouwd.

In dit geval heeft de eventuele reststerkte van de constructie hoogstens een positief effect op de mate van afslag en de veiligheid van de waterkering. De meest extreme maatgevende afslag zou eventueel niet kunnen optreden.

Deze situatie is geschetst in figuur 2.5a.

Bescherming (te) zwak buitentalud

Indien er sprake is van een dijk die weliswaar de volledige hydraulische belasting niet kan weerstaan maar toch nog een zekere golfbelasting kan hebben, kan het voorliggende duin iets minder robuust worden uitgevoerd. In dit geval dient het duin als eerste buffer en resteert er na duinafslag slechts een beperkte golfaanval op de constructie. Deze golfaanval moet dan zodanig zijn dat de aanwezige dijkbekleding en het binnentalud van de dijk deze belasting nog net kunnen weerstaan (zie figuur 2.5b). Een dergelijke dimensionering is overigens relatief gezien meer problematisch.

In feite zijn er bij een de dijk-achter-duin-variant dus twee opties.

In de (eerste) uitwerkingen is gekozen voor de robuuste eerste variant.

2.7.3 Duin-achter-dijk (landwaartse versterking)

In dit geval is sprake van een landwaartse versterking waarbij, in het meest extreme geval de aanwezige dijk als volledig zandig kan worden beschouwd. In dit geval kan de eventuele reststerkte van de dijk echter aanleiding geven tot ongewenste effecten.

Indien er immers slechts plaatselijk sprake is van het falen van de dijkconstructie (de bekleding gaat immers altijd ergens als eerste kapot) zal er lokaal als gevolg van het zijdelings wegvloeien van afgeslagen zand sprake zijn van een extra grote hoeveelheid afslag. De hiermee samenhangende locale teruggang van het duinfront zal de waarde als aanwezig bij een volledig zandig profiel per definitie overtreffen. Hierbij moet gedacht worden aan tientallen meters extra afslag (zie figuur 2.5d).

Een en ander leidt dus tot de noodzaak om een extra zandbuffer aan te brengen. De omvang van de extra zandbuffer hangt overigens mede af van het faalbereik van de dijkconstructie (het traject van mogelijk eerste falen tot zeker compleet falen). Op de dimensionering van deze extra buffer wordt later nog teruggekomen (zie verderop).

Afdekking (te) zwak binnentalud

Ook bij de duin-achter-dijk-variant kan een tweede optie worden onderscheiden. In dit geval is sprake van een stabiele dijkbekleding aan de buitenzijde maar voldoet het

binnentalud niet. De aanval op het binnentalud wordt daarbij voorkomen door het aanbrengen van een voldoende dikke slijtlaag. Tijdens maatgevende condities wordt er door overslaand water materiaal van deze slijtlaag afgevoerd. De aangebrachte hoeveelheid materiaal is echter zodanig groot dat het onderliggende (te zwakke) dijktaalud steeds nog voldoende wordt afgeschermd (zie figuur 2.5c).

In feite zijn er bij een de dijk-achter-duin-variant dus ook twee opties. In de (eerste) uitwerkingen is gekozen voor de robuuste eerste variant inclusief de extra zandbuffer voor de opvang van het effect van een lokaal falende dijk. Deze extra buffer is in het vervolg aangeduid met de term 'brestoeslag'.

2.7.4 Samenvatting

In tabel 2.13 is een samenvattend overzicht gegeven van de verschillende versterkings-opties bij aanwezigheid van een (te zwak) dijkprofiel.

Versterking	Uitwerking	Rol constructie	Opmerkingen
Zeewaarts	Dijk-achter-duin	Geen	Normale duinafslag op zandig profiel
		Beperkt (golfaanval)	Duinmassief als remming op golfaanval
Landwaarts	Duin-achter-dijk	Beperkt (golfoverslag)	Duin als slijtlaag op binnentalud
		Geen	Extra buffer nodig voor plaatselijk falen

Tabel 2.13: Overzicht versterkingsopties bij een (te zwak) dijkprofiel.

In het overzicht varieert de omvang van de constructie af van robuust zeewaarts tot robuust landwaarts. In de uitwerkingen wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van de meest robuuste oplossingen zonder het *positieve* effect van de constructie in rekening te brengen. Met het *negatieve* effect zal echter nog wel rekening moeten worden gehouden.

Een en ander is in figuur 2.5 schematisch weergegeven.

In de volgende paragraaf is een invulling gegeven aan de kwantificering van de zogenaamde 'brestoeslag'.

2.7.5 Kwantificering 'brestoeslag' (bij landwaartse versterkingen)

In het geval van een landwaartse versterking van een waterkering met een (op termijn) te zwakke dijk wordt er achter de oorspronkelijke dijk een zandaanvulling aangebracht. Deze situatie is schetsmatig weergegeven in figuur 2.6. De bovenste afbeelding (afbeelding a) geeft de gehanteerde definitie van deze 'brestoeslag'.

In figuur 2.6b is de situatie met een volledig zandige waterkering gegeven. In dit geval zal de maatgevende afslag resulteren in een achter op de versterking gelegen afslagpunt. Voorwaarde voor deze ontwikkeling is natuurlijk dat de constructie daadwerkelijk als geheel en bij voorkeur in een keer bezwijkt.

Effect slechts plaatselijk bezwijken van dijk

Indien dit laatste niet het geval is, zal er plaatselijk geen afslag plaatsvinden en zal zich voor de niet bezwijken dijk een ontgrondingskuil ontwikkelen. Deze situatie is ook aangegeven in figuur 2.6c. In deze figuur is ook het eerder besproken 'normale' afslagprofiel gegeven. Uit een vergelijking van de post-storm profielen is op te maken dat er voor de dijk sprake is van een relatief laag gelegen profiel.

Dit niveauverschil leidt in het geval van een plaatselijk bezwijken dijk tot het zijdelings afvoeren van materiaal uit het afslagprofiel. Het materiaal van het in het gat gelegen hogere afslagprofiel zal zich zijdelings richting het lager gelegen 'ontgrondingskuilprofiel' bewegen. Hiermee wordt er dus feitelijk materiaal aan het afslagprofiel onttrokken waardoor deze wordt 'ondergraven'

Deze situatie is geschetst in de onderste figuur (2.6d). Door het verlies van materiaal zal het afslagprofiel in het gat in landwaartse richting verplaatsen; de evenwichtsvorm moet immers weer worden hersteld. Teneinde deze extra teruggang van het afslagfront te kunnen opvangen dient de versterking aan de achterzijde te worden uitgebreid met een 'brestoeslag'.

Omdat natuurlijk niet zeker is waar de dijk het eerst bezwijkt (en er dus sprake is van een 'gat') dient deze toeslag over het volledige traject met een landwaartse versterking te worden aangebracht.

Aanpak kwantificering extra (bres)toeslag

De formulering voor de extra toeslag kan in basis worden ontleend aan de resultaten van een in 1994 in opdracht van de toenmalige TAW uitgevoerde bureaustudie [Steetzel, 1994]. De hierin opgenomen formuleringen zijn gebruikt voor de in de VTV opgenomen toetsingsrichtlijnen.

De hiertoe gevolgde redenering is samengebracht in figuur 2.7.

Kwantificering basiswaarde ΔR_r (eenzijdige eindconstructie)

Centraal in deze uitwerking (en die van de VTV) staat de kwantificering van de hoeveelheid extra duinafslag direct naast een zogenaamde halfoneindige bebouwing. De meest eenvoudige vorm van de daarbij behorende formulering van de extra (rand)erosie ΔR_r luidt (zie paragraaf 3.6 in [Steetzel, 1994]):

$$\Delta R_r = (\Delta A_o / h_A) \cdot [1 / (\sqrt{\delta} + \delta)]$$

waarin: ΔA_o het verschiloppervlak (het zogenaamde onthouden afslagvolume)
 h_A het niveauverschil tussen de teen en de bovenzijde van het afslagprofiel
 δ de verhouding tussen de laagdikte van de afzetting h_o en h_A

en: h_o het niveauverschil tussen deze teen en de doorsnijding van het afslagprofiel met de dijk.

Figuur 2.7a geeft de definitie van deze parameters.

De grootte van de basiswaarde ΔR_r hangt dus af van het afslagvolume A_o , de werkende hoogte h_A en de δ -verhouding.

Met gebruikmaking van enkele realistische waarden met:

- het afslagvolume A_o tussen de 200 tot 300 m³/m¹ *);
 - de werkende hoogte h_A van orde (NAP+12 m min NAP-2 m) is 14 m
 - een δ -verhouding van orde 0,5 en dus $[1 / (\sqrt{\delta} + \delta)] = 0,8$
- volgt voor ΔR_r een waarde van $(250 / 14) \times 0,8 =$ orde 15 m.

* Als karakteristieke waarde bij een landwaartse versterking voor 50 jaar.

Deze uitwerking heeft echter betrekking op een zogenaamde (eenzijdig gesloten) eindconstructie. Ten opzichte van deze situatie zijn er in het voorliggende geval echter twee belangrijke afwijkingen, namelijk:

- = er is door het gat sprake van een tweezijdige afvoer van materiaal;
- = er is geen sprake van een zijdelings opgesloten gat,

zodat er nog enkele correcties door te voeren zijn.

Kwantificering waarde ΔR_g voor een (opgesloten) gat

In het geval van een eindige onderbreking (dus een lokaal gat) neemt de teruggang toe als gevolg van het mogelijk in twee richtingen wegvloeien van het afslagmateriaal. Deze situatie is schematisch weergegeven in figuur 2.7b.

De maximaal mogelijke waarde van de hierbij optredende teruggang in een dergelijk gat is gelijk aan (zie paragraaf 4.5 in [Steetzel, 1994]):

$$\Delta R_g = (\Delta A_o / h_A) \cdot (1 / \delta)$$

ofwel, met $\delta = h_o / h_A$:

$$\Delta R_g = (\Delta A_o / h_o)$$

De grootte van de (maximale) teruggang hangt dus af van de 'vrije' afslag in het gat ΔA_o en de het niveauverschil h_o . De grootte van het niveauverschil bedraagt veelal 'een meter of vijf'. De vrije afslag in het gat hangt af van de lokale situatie.

Ook hier kan de orde van grootte weer worden afgeschat. In dit geval levert dit als orde-van-grootte ongeveer 35 m.

In algemene zin kan voor de verhouding tussen ΔR_g en ΔR_r worden afgeleid:

$$\Delta R_g / \Delta R_r = 1 + \sqrt{1 / \delta}$$

Substitutie van $\delta = 0,5$ levert $\Delta R_g / \Delta R_r = 2,4$.

Overigens treedt deze waarde in principe alleen op bij een zeer klein gat. Bij een groter gat neemt deze verhouding af. Omdat er feitelijk geen zekerheid bestaat over de breedte van het gat wordt de conservatieve aanname als bruikbaar aangehouden.

Kwantificering waarde ΔR_b voor een (niet opgesloten) gat

In het voorliggende geval is het natuurlijk ook zo dat de toelevering van materiaal niet alleen van het gebied recht achter het gat vandaan hoeft te komen. Ook hier kan sprake zijn van een zijdelingse aanvoer. Deze situatie is gegeven in figuur 2.7c.

In dit geval dient een feitelijk een reductie op het onthouden afslagvolume in rekening te worden gebracht. De reductie-waarde k is daarbij gedefinieerd als de verhouding tussen de effectieve onthouding A_o^* en de basiswaarde A_o (zie paragraaf 4.3 in [Steetzel, 1994]).

Voor deze k -waarde is nog geen relatie beschikbaar, maar een afschatting kan natuurlijk wel worden gemaakt. Indien wordt uitgegaan van de redelijke veronderstelling dat de toelevering van beide zijden orde 25% van het benodigde volume bedraagt (en dus 50% echt van direct achter het gat komt), volgt voor de k -waarde dus $k = 0,5$.

De uiteindelijke formulering voor de brestoeslag ΔR_b wordt derhalve:

$$\Delta R_b = (\Delta A_o / h_o) \cdot k$$

waarin: k een reductiefactor ter verrekening van de tweezijdige aanvoer (= 0,5).

Substitutie van de eerder genoemde waarden als resultaat ΔR_b is orde 20 m.

Conclusie

In het vorige is, aansluitend op de aan de VTV ten grondslag liggende uitwerking een invulling gegeven aan de kwantificering van de gezochte 'brestoeslag'.

Substitutie van karakteristieke getalswaarden levert hierbij een extra benodigde aanvulling van 20 m als resultaat. De volgens een reguliere duinafslagberekening berekende landwaartse versterking dient dan ook met deze maat te worden vergroot.

Slotopmerkingen

De noodzaak tot het in rekening brengen van deze extra toeslag hangt natuurlijk samen met de relatieve kwaliteit van de dijkconstructie. Als de dijk niet meer voldoet voor de huidige hydraulische randvoorwaarden en er wordt geen actief onderhoud gepleegd, dan mag het duidelijk zijn dat de kans dat de dijk bezwijkt bij zwaarder wordende ontwerpcondities groter is.

Met andere woorden: voor de condities over 50 jaar zal er eerder bezwijken optreden dan nu het geval is. Voor een termijn van 200 jaar is dit nog veel waarschijnlijker. Een en ander betekent echter dat het als dan niet in rekening brengen van een zekere brestoeslag feitelijk ook een functie is van de zwaarte van de landwaartse versterking. Voorgesteld wordt dan ook om deze brestoeslag alleen in rekening te brengen voor een 50-jaars versterking.

In deze uitwerking is steeds uitgegaan van een extra breedte van de benodigde aanvulling. Het is natuurlijk ook mogelijk om het extra benodigde materiaal boven op de regulier berekende aanvulling aan te brengen.

3 Resultaten duinafslagberekeningen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten gepresenteerd van de duinafslagberekeningen zoals deze voor *alle* aanwezige dwarsprofielen zijn uitgevoerd. De berekeningen zijn dus ook uitgevoerd voor de aanwezige dijkprofielen. Een deel van de aanwezige dijken zal immers op termijn ook niet meer voldoen (zie beheerdersoordeel) en zal derhalve ook moeten worden versterkt.

De voor de berekeningen gehanteerde uitgangspunten zijn reeds in het vorige hoofdstuk aan de orde geweest. De resultaten van deze uitwerkingen zullen in het MER-traject worden gebruikt voor de onderlinge afweging van de verschillende alternatieven

Zichtperiodes

De berekeningen zijn uitgevoerd voor vier verschillende zichtperiodes, te weten:

- De huidige situatie;
- De situatie over 50 jaar;
- De situatie over 100 jaar;
- De situatie over 200 jaar.

De resultaten voor de huidige situatie zijn daarbij indicatief voor de huidige veiligheid van het dwarsprofiel als duinwaterkering.

Zonder en met bodemstijging

Omdat uit het voorafgaand blijkt dat het al dan niet meestijgen van de het zandige strand met de zeespiegelstijging nogal een belangrijk punt zijn er zowel berekeningen uitgevoerd zonder als met een meestijgende bodem.

3.2 Uitgangspunten vormgeving versterkingen

Daar waar een bepaald dwarsprofiel niet voldoet is het dwarsprofiel versterkt door middel van een aanvulling met extra zand.

Hierbij is onderscheid gemaakt tussen twee verschillende soorten versterkingen, te weten:

- Een landwaartse versterking aan de achterzijde van de waterkering;
- Een zeewaartse versterking aan de voorzijde van de waterkering.

In beide gevallen is daarbij juist voldoende zand toegevoegd om het duinprofiel net te laten voldoen. In het totaal zijn daarbij dus acht verschillende combinaties van zichttermijnen en soorten versterkingen doorgerekend.

De omvang van de (op termijn) benodigde versterking (hetzij qua volume in m^3/m^1 of qua breedte) is daarbij dus indicatief voor het veiligheidstekort. Het moment van optreden van de benodigde versterkingen zegt iets over de zogenaamde veiligheids-horizon.

Duidelijk mag zijn dat er ten aanzien van de vormgeving van de versterkingen sprake is van een breed scala aan mogelijkheden. Naast deze grote vrijheid is de keuze bovendien nog afhankelijk van de specifieke lokale situatie waarbij ook de morfologie nog een rol speelt.

In het kader van deze reeks berekeningen is bewust gewerkt met een aantal specifieke eenduidige uitgangspunten voor de vormgeving van de versterkingen.

Een hiervan enigszins afwijkende keuze kan per definitie leiden tot enigszins andere resultaten. Daar waar het doel van deze berekeningen echter vooral betrekking heeft op onderlinge vergelijking van bijvoorbeeld een landwaartse of een zeewaartse variant zijn de resultaten echter goed bruikbaar.

Bij de een meer definitieve uitwerking ten behoeve van het versterkingsplan kunnen de uitgangspunten voor de vormgeving van de versterking natuurlijk speciaal worden afgestemd op de lokale situatie en wensen. Deze 'nadere verdieping' komt in het volgende hoofdstuk aan de orde.

Landwaartse aanvullingen

In het geval van een landwaartse versterking is in de hier gepresenteerde serie berekeningen gebruik gemaakt van een versterking tot op het niveau van het kruinniveau van het zogenaamde grensprofiel. Een en ander leidt tot een in langrichting uniforme hoogte van de aanvulling.

Voor de achterzijde van de versterking is een helling van 1 : 2 (conform het binnentalud van het grensprofiel) aangehouden. In werkelijkheid zal er overigens voor deze helling een flauwere helling (bijvoorbeeld tenminste 1 : 3) worden aangehouden.

Dit heeft overigens alleen effect op de grootte van het benodigde aanvulvolume. De benodigde breedte van de aanvulling wordt overigens worden beschouwd als het meest relevante berekeningsresultaat.

Zeewaartse (berm)aanvullingen

In het geval van een zeewaartse versterking is voor de bovenzijde het niveau van de aanwezige duintop of (als deze erg laag is gelegen) het kruinniveau van het benodigde grensprofiel. De versterking is hierbij uitgevoerd als een zogenaamde berm met een zeewaarts talud onder 1 : 4. Feitelijk betreft het hier dus een duinverbreding. Omdat het 1 : 4 talud in de omgeving van de waterlijn natuurlijk niet stabiel zal zijn, is voor het gedeelte onder de duinvoet (NAP+3 m) een veel flauwere helling van 1 : 10 aangehouden.

Duidelijk mag zijn dat de resultaten van de berekeningen natuurlijk mede worden bepaald door deze vormgeving. Ook hier geldt echter dat een meer specifieke uitwerking gericht op de lokale situatie in het volgende hoofdstuk aan de orde komt. Voor de locaties waarbij er sprake blijkt te zijn van een min of meer stabiele vorm van het dwarsprofiel is daarbij ook een versterking door middel van een zeewaartse verschuiving van het dwarsprofiel in beschouwing genomen.

Op de onderlinge verschillen tussen de berm- en de schijf-aanvulling wordt verderop nog teruggekomen.

3.3 Berekeningsresultaten

3.3.1 Algemeen

Voor elk van de betrokken profielen (79 stuks) zijn 8 maal 2 (zonder en met bodemstijging) verschillende berekeningen uitgevoerd. De resultaten zijn beschikbaar in de vorm van tabellen en profielen.



In de tabellen zijn per situatie gegeven:

- de omvang van de (eventueel) benodigde versterking (in m^3/m^1);
- een breedte van de (eventueel) versterking (in m op de kruin).

Verder zijn als PDF-bestand dwarsprofielen beschikbaar met daarin:

- het initiële dwarsprofiel;
- de (eventueel) benodigde (landwaartse of zeewaartse) versterking;
- het afslagprofiel en de positie van het grensprofiel.

De resultaten zijn (mede ter controle) beschikbaar in de vorm van:

- 8 maal 2 PDF-bestanden met daarin per versterking/periode-combinatie alle dwarsprofielen;
- 79 maal 2 PDF-bestanden met per dwarsprofiel alle versterking/periode-combinaties.

In het laatste geval van 200 jaar landwaarts t/m 200 jaar zeewaarts.

In het volgende wordt nader ingegaan op de verschillende getalswaarden.

3.3.2 Huidige situatie

De resultaten voor de huidige situatie zijn samengebracht in tabel 3.1.

In deze tabel zijn de per dwarsprofiel zowel de versterkingsvolumes als de daarbij behorende breedte van de benodigde versterking gegeven.

De dwarsprofielen die niet voldoen hebben in alle geval betrekking op dijkprofielen.

Alleen dwarsprofiel km 13.81 voldoet niet als duin.

Opgemerkt moet worden dat de zeewaartse versterkingen soms kunnen vragen om zeer grote volumes, dit als gevolg van de aanwezigheid van een diepe geul vlak onder de kust. In dit geval is een zeewaartse aanvulling natuurlijk ook niet opportuun.

De volumes van de achterwaartse versterkingen zijn mede afhankelijk van de beschikbaarheid van voldoende landwaartse profielinformatie. Daar waar deze ontbreekt is gerekend met een versterking boven het NAP-niveau. De waarden zijn dus soms aan de hoge kant (het lokale maaiveld ligt immers ruim boven NAP). De breedte van de versterking is overigens ongevoelig voor deze aspecten. Deze is dan ook gebruikt om (met gebruik van aanvullende informatie aangaande de bodemligging) het benodigde volume nader en beter te kwantificeren.

De omvang van de zeewaartse versterking overtreft overigens per definitie veelal de waarde van een landwaartse aanvulling.

3.3.3 Landwaartse versterkingen

De omvang van de benodigde landwaartse versterkingen zijn voor de vier zichtperiodes samengebracht in tabel 3.2. De situatie na 0 jaar heeft hierbij natuurlijk weer betrekking op de huidige situatie. Tabel 3.2a heeft hierbij betrekking op de situatie zonder bodemstijging, tabel 3.2b op de situatie met bodemstijging.

Door de verzwaring van de condities neemt zowel de omvang als het aantal versterkingen in de tijd toe. Voor de situatie over 200 jaar voldoet haast geen enkel profiel meer.

Het rekening houden met bodemstijging (vergelijk tabel 3.2b met tabel 3.2a) laat zien dat dit natuurlijk reducerend werkt op de omvang van de benodigde versterkingen.

3.3.4 Zeewaartse versterkingen

De omvang van de benodigde zeewaartse versterkingen zijn voor de vier zichtperiodes op een soortgelijke wijze samengebracht in de tabel 3.3a en 3.3b. De situatie na 0 jaar heeft ook hier weer betrekking op de huidige situatie.

Door de verzwaring van de condities neemt ook hier de omvang als het aantal versterkingen in de tijd toe. Het rekening houden met bodemstijging beperkt de omvang van de versterking.

3.4 Nadere analyse

3.4.1 Veiligheidshorizon

Indien er op enige termijn noodzaak bestaat tot het versterking van de waterkering is het moment waarop dit nodig blijkt een maat voor de veiligheidshorizon.

In de tabellen 3.4a en 3.4b is de grootte van de veiligheidshorizon in tabelvorm weergegeven. Ook hieruit blijkt dat op de zeer lange termijn bijna alle profielen niet meer voldoen. Bij het in rekening brengen van bodemstijging is dit iets minder het geval (zie tabel 3.4b).

De locaties van de te versterken profielen zijn grafisch weergegeven in de figuren 3.1 t/m 3.4.

3.4.2 Landwaartse versterkingsomvang

In figuur 3.5a en 3.5b is de benodigde omvang van de landwaartse versterking weergegeven als functie van de locatie langs de kust. Hierin zijn (vergelijkbaar met de figuren 3.1 t/m 3.4) de zwakke kustsecties duidelijk herkenbaar.

Uit de figuren blijkt ook dat het verschil in versterkingsomvang tussen de 0, 50 en 100 jaar soms relatief beperkt is. De omvang voor het meer extreme 200-jaar scenario is significant groter. Uit vergelijking van de resultaten zonder en met bodemstijging komt opnieuw naar voren dat de versterking in het laatste geval orde tientallen meters minder breed hoeft te zijn.

3.4.3 Zeewaartse versterkingsomvang

Op vergelijkbare wijze is in figuur 3.6a en 3.6b de benodigde omvang van de zeewaartse berm-versterking weergegeven als functie van de locatie langs de kust. Ook hierin zijn de zwakke kustsecties duidelijk herkenbaar.

Uit vergelijking van de resultaten zonder en met bodemstijging komt opnieuw naar voren dat de versterking orde tientallen meters minder breed hoeft te zijn.

3.4.4 Zeewaarts versus landwaarts

Figuur 3.7a en 3.7b geven voor de situatie over 50 jaar de benodigde omvang van beide versterkingen in een enkel figuur weer. Zowel in landwaartse als in zeewaartse zin bedraagt de benodigde verbreding enkele tientallen meters. Zoals al eerder geconstateerd is de benodigde versterkingsomvang voor het traject km 3 tot km 4 significant groter.



3.5 Gebruik resultaten

3.5.1 Bodemstijging

De hier berekenende omvang van de benodigde versterkingen is gebruikt voor de verder uitwerking in het MER-traject.

Daar waar bij aanwezigheid van een dijkconstructie de landwaartse versterking van belang is zijn de resultaten van de situatie zonder bodemverhoging gebruikt. Bij een zeewaartse aanvulling is daarentegen wel rekening gehouden met de verwachte bodemstijging.

3.5.2 Anticipatie op meer gedetailleerde zeewaartse uitwerking

Zoals reeds aangegeven hebben de hier gepresenteerde resultaten in principe betrekking op de op termijn benodigde versterkingen. In het volgende hoofdstuk komen de meer gedetailleerde uitwerkingen aan de orde waarbij ook reeds rekening is gehouden met de lokale morfologie en het hierbij verwachte onderhoud. Ook is hierbij uitgegaan van het nu reeds aanbrengen van de versterking.

Met name voor de zeewaartse aanvullingen zal dit leiden tot een gewijzigde aanvullingsbehoefte.

Teneinde reeds nu hiermee rekening te houden zijn de hier gepresenteerde resultaten 'vertaald' naar een thans uitgevoerde morfologische versterking.

Hiertoe is voor een aantal profielen het voorliggende resultaat voor de situatie over 50 jaar vergeleken met het resultaat van de in hoofdstuk 4 gepresenteerde uitwerkingen. Daaruit komt naar voren dat:

- De breedte van de benodigde versterking orde 30 % geringer wordt indien deze niet wordt uitgevoerd als berm maar als schijf;
- De omvang van de benodigde versterking orde 50 tot 80 % zwaarder uitvalt.

Deze verschillen worden veroorzaakt door de volgende oorzaken:

- Bij de hier gepresenteerde sommen is gekeken naar de op termijn benodigde versterkingen. Hierbij is gebruik gemaakt van het relatief zwakke BKL-profiel, rekeninghoudend met 50 jaar zeespiegelstijging en dus ook 50 jaar bodemstijging. De versterking is hierbij aangebracht als relatief hooggelegen berm met een zeewaarts 1:4 profiel.
- Bij de gedetailleerdere uitwerkingen is uitgegaan van het thans aanwezige profiel van 2005 en is nu de 50-jaars versterking aangebracht door het geheel vanaf duintop tot orde NAP-8 m zeewaarts te verschuiven.

Het verschil is daarbij feitelijk driedelig, te weten:

- Het dwarsprofiel dat in het 2005-geval meer zand bevat. Dit levert een reductie in het aanvulvolume ten opzichte van de eerste berekening; het verschil hangt af van de lokale situatie. Bij een verschil tussen de MKL en de BKL van orde 10 m (redelijke waarde) zit er dan tussen de NAP+3 m en de NAP-8 m orde $50 \text{ m}^3/\text{m}^1$ meer zand in het profiel;
- Het feit dat nu het effect van zeespiegelstijging en toekomstig kustonderhoud op het kustprofiel nu niet wordt afgewacht (dit scheelt bij een breedte van het afslagprofiel van 150 tot 200 m orde $0,30 \text{ m}$ maal $175 = \text{orde } 50 \text{ m}^3/\text{m}^1$);
- Het feit dat er nu een meer morfologisch stabiele aanvulvorm wordt gekozen waarbij ook het diepere kustdeel direct bij aanleg wordt aangevuld. Nu wordt er dus aangevuld tot NAP-8 m terwijl normaal de aanvulling tot orde NAP m zou

lopen. Dit vraagt om een relatief grotere aanvulhoeveelheid.

Ten opzichte van een aanvulling tussen NAP+12 m en orde NAP neemt de aanvulling dus met orde $(12 - -8) / (12 - -0) = 20 / 12 =$ orde een factor 1,7.

Samenvattend is er (orde $50 \text{ m}^3/\text{m}^1$) minder nodig door het huidige profiel te gebruiken en (orde $50 \text{ m}^3/\text{m}^1$) meer nodig door het niet afwachten van de bodemstijging (of feitelijk het toekomstige onderhoud). Deze beide heffen elkaar ongeveer op. Blijft het effect van het morfologisch profiel. Dit vraagt om orde 2/3 meer zand. Feitelijk dus aangebracht ter voorkoming van relatief veel (initieel) kustlijnonderhoud. Door nu reeds rekening te houden met deze correcties wordt reeds in het MER-afwegingstraject aangesloten op de latere resultaten van het daadwerkelijke versterkingsplan.

Overigens moet worden opgemerkt dat een dergelijke correctieslag voor de landwaartse versterkingen natuurlijk niet nodig is. De benodigde versterkingsomvang moet immers worden gedimensioneerd op basis van het BKL-profiel en directe morfologische effecten op de landwaartse aanvulling zijn er natuurlijk niet.

De enige correctie die wel moet worden doorgevoerd heeft betrekking op de toevoeging van de zogenaamde 'brestoeslag' (zie vorige hoofdstuk).

4 Resultaten detailberekeningen duinveiligheid

4.1 Inleiding

In aanvulling op de in het vorige hoofdstuk gepresenteerde resultaten is in dit hoofdstuk een meer gedetailleerde uitwerking gegeven voor een aantal geselecteerde locaties. Hierbij is dus daadwerkelijk invulling gegeven aan het ontwerp van de benodigde versterking. Genoemde berekeningen vinden dan ook plaats in het kader van het zogenaamde versterkingsplan.

Speciale aandacht gaat daarbij natuurlijk uit naar de echt relevante combinaties van versterkingsrichting (landwaarts of zeewaarts) en zichtperiode.

Overigens zijn de in het volgende opgenomen resultaten (achteraf gezien) feitelijk te beschouwen als 'verkenningen'. In de loop van de studie zijn soms immers volledig andere uitwerkingen gekozen (zie tweede deel van deze rapportage vanaf hoofdstuk 9).

Bij de vormgeving van deze versterkingen is ook reeds rekening gehouden met de resultaten van de morfologische uitwerkingen zoals in het tweede deel van deze rapportage uitgebreider aan de orde komt.

Hieruit komt naar voren dat er in veel gevallen sprake is van een relatief stabiele vorm van het dwarsprofiel. Een morfologisch gunstige vorm (met dus relatief weinig 'intern' onderhoud) van de versterking is in dit soort gevallen dan ook de zogenaamde schijf-aanvulling. Daarbij wordt de zeewaartse zijde van het dwarsprofiel feitelijk over een zekere afstand in horizontale richting verplaatst. Door dit niet alleen te doen voor het kustdeel dat binnen het afslagprofiel valt maar ook het diepere deel van het dwarsprofiel op deze wijze aan te vullen wordt een situatie bereikt waarbij er sprake is van minimaal verlies in dwarsrichting.

In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de (initieel) hierbij beschouwde locaties.

Nr	Km raai	Locatie/traject	Opmerkingen
3	0.51	Breskens-Oost	Zeewaartse versterking
7	1.71	Breskens-Veste	Landwaartse versterking (of zeewaarts)
29	5.84	Traject Nieuwvliet-Bad/Groede	Zeewaartse (of landwaartse) versterking
34	6.84		
36	7.30		
39	7.78		
53	10.21	Traject Cadzand-Bad	Zeewaartse versterking
56	10.68		
60	11.62		
62	12.14		
68	13.35		
70	13.63		
72	13.81		

Tabel 4.1: Overzicht geselecteerde raaien voor detailuitwerkingen.

De verschillende raaien (zie ook figuur 2.1) zijn verdeeld over de verschillende deeltrajecten van de westkust van West Zeeuwsch-Vlaanderen.

Km raai 0.51 (volgnummer 3) bevindt zich oostelijk van de Veerhaven in het deel waar er gezocht wordt naar een zeewaartse versterking.

Volgnummer 7 met km raai 1.71 bevindt zich midden voor de vesting en is karakteristiek voor de situatie met een landwaartse versterking ter plaatse van een steile vooroever.

De volgende vier dwarsprofielen bevinden zich op het traject Nieuwvliet-Bad Groede alwaar naast een landwaartse variant ook moet worden gezocht naar een zeewaartse oplossing.

De volgende vijf profielen bevinden zich op het traject Cadzand-Bad alwaar een robuuste zeewaartse versterking wordt nagestreefd.

De laatste twee raaien zijn zuidwestelijk van de uitwateringssluis gelegen alwaar er geen ruimte aanwezig is voor een landwaartse oplossing.

In het volgende worden de verschillende profielen per traject behandeld.

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 is steeds hetzelfde materiaal (met een rekenwaarde van 200 μ m) gebruikt. Verder is de relevant geachte zichtperiode beperkt tot 100 jaar.

4.2 Detailuitwerking traject Breskens-Oost

Het hier beschouwde dwarsprofiel bevindt zich oostelijk van de oostelijke dam van de Veerhaven. Het vigerende 2005-profiel is gegeven in figuur 4.1.

Een overzicht van de gebruikte randvoorwaarden is gegeven in tabel 4.2.

Nr	Km raai	Rekenpeil [m.tov NAP]		Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]
		50 jaar	100 jaar		
1	0.11	5,95	6,30	3,00	11,9
3	0.51	5,95	6,30	3,00	11,9

Tabel 4.2: Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofiel Breskens.

In de figuur zijn ook de resultaten van de uitgevoerde duinafslagberekeningen toegevoegd. Zoals blijkt is het duin voor deze locatie thans voldoende robuust en is er uit waterkeringstechnisch oogpunt geen noodzaak tot het aanbrengen van een versterking. Feit is natuurlijk wel dat hier (bij km raai 0.51) recent een grote suppletie heeft plaatsgevonden.

Enkele opmerkingen:

- In aanvulling op de geselecteerde raai zijn in de figuren 4.1a t/m 4.1c ook de berekeningsresultaten voor de andere drie raaien gegeven.
- In de figuren is ter aanvulling ook het zogenaamde BKL-profiel gegeven. Hieruit blijkt dat er thans veel meer sediment aanwezig is.
- Bij de vormgeving en mogelijkheden voor een (zeewaartse) versterking kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van de uitgevoerde morfologische analyses.

4.3 Detailuitwerking traject Breskens-Veste

Het hier beschouwde dwarsprofiel bevindt zich centraal voor de Scheldeveste. Uitgaande van een falende kering zal hier dus een versterking van de kering nodig zijn.

Aangezien een zeewaartse uitbouw hier geen echte optie is dient de versterking in landwaartse richting plaats te vinden.

Teneinde een zo smal mogelijke versterking te verkrijgen is ervoor gekozen om de bovenzijde van de versterking aan te laten sluiten op het aanwezige kruinniveau van NAP+11 m. De huidige binnenkruinrand is gelegen op 80 m landwaarts van de RSP-lijn.

Een overzicht van de voor de afslagberekeningen gebruikte randvoorwaarden is gegeven in tabel 4.3.

Nr	Km raai	Rekenpeil [m.tov NAP]		Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]
		50 jaar	100 jaar		
7	1,71	5,95	6,30	3,64	11,9

Tabel 4.3: Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofiel Scheldeveste.

Uit de resultaten blijkt dat de benodigde kruinbreedte van de binnenaanvulling voor de situatie over 50 en 100 jaar respectievelijk 20 en 30 m bedraagt. Hierbij is gekozen het maatgevende afslagpunt te laten samenvallen met deze binnenkruinrand. Feitelijk kan het duin nog iets (enkele meters) smaller.

De nieuwe binnenkruinrand komt daarmee op respectievelijk 100 en 110 m landwaarts van de RSP-lijn.

Effect onzekerheid niveau voorland

Dit laatste resultaat hangt natuurlijk samen met de exacte ligging van het voorland. Indien deze (veel) lager is gelegen neemt de hoeveelheid benodigde aanvulling aan de achterzijde sterk toe.

In figuur 4.2a zijn ook de profielen voor een aantal andere jaren toegevoegd. Hieruit blijkt dat de vooroever blijkbaar orde 1 m lager kan liggen. Op de vooroever scheelt dit orde 100 m³/m¹ aan materiaal in de balanszone. Uitgaande van een onderzijde van de afzetting op orde NAP-1 m en een kruin op NAP+ 11 m is sprake van een 12 m dikke balanslaag. Een dergelijke lagere bodemligging zal dus resulteren in 100/12 is orde 10 m extra landwaartse verschuiving van het afslagpunt.

Op grond hiervan moet dus worden gerekend op een benodigde kruinbreedte van de binnenaanvulling van respectievelijk 30 en 40 m voor de situatie over 50 en 100 jaar.

Effect lokaal falen dijkbekleding: de 'brestoeslag'

Door het lokaal falen van de dijkbekleding kan er lokaal sprake zijn van extra afslag. Het effect tijdens maatgevende omstandigheden is echter ook afhankelijk van de kwaliteit (reststerkte) van de aanwezige kering. Op basis van de uitwerkingen als gegeven in hoofdstuk 2 gaat het daarbij om een extra aanvulling van 20 m in landwaartse richting.

Afweging zachte versus harde versterking

In het totaal zou de benodigde landwaartse aanvulling hier dus 50 tot 60 m moeten bedragen. Omdat deze ruimte er feitelijk niet is lijkt het voor dit deeltraject dan ook meer opportuun om hier de dijk zelf te versterken.

4.4 Detailuitwerking traject Nieuwvliet-Bad - Groede

Het hier beschouwde dwarsprofielen zijn verspreid over het deeltraject Nieuwvliet-Bad - Groede. Volgnummer 29 bevindt zich daarbij het meest oostelijk nabij Nieuwsluis. Volgnummer 39 bevindt zich oostelijk van het Kruishoofd.

Een overzicht van de gebruikte randvoorwaarden is gegeven in tabel 4.4.

Nr	Km raai	Rekenpeil [m.tov NAP]		Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]
		50 jaar	100 jaar		
29	5.84	5.88	6.23	4.02	11.9
34	6.84	5.87	6.22	4.19	11.9
36	7.30	5.86	6.21	4.28	11.9
39	7.78	5.85	6.20	4.36	11.9

Tabel 4.4: Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofielen Nieuwvliet-Bad - Groede.

De resultaten van de uitgevoerde duinafslagberekeningen zijn samengebracht in de figuren 4.3 t/m 4.6. Zoals blijkt uit het in figuur 4.3 opgenomen resultaat is er voor km raai 5.84 geen noodzaak aanwezig tot het aanbrengen van een (zeewaartse) versterking.

In de drie meer westelijk gelegen raaien is dit wel het geval.

In deze gevallen is gekozen voor het vooruitschuiven van het aanwezige profiel tot op een niveau van NAP+11,5 m zijnde het kruinniveau van het huidige duin.

De benodigde verschuiving voor de situatie over 50 jaar bedraagt voor de drie profielen respectievelijk 20, 30 en 40 m. Voor de situatie over 100 jaar komt daarbij nog 10 m bij.

Het benodigde volume is afhankelijk van de morfologische noodzaak tot het doorzetten van het aanlegprofiel tot dieper water. Indien slechts tot orde NAP tot NAP-1 m wordt aangevuld is per m¹ zeewaartse versterking 12 m³/m¹ aanvulmateriaal nodig.

Indien een aanvulling tot orde NAP-8 m wordt uitgevoerd is per m¹ zeewaartse versterking 20 m³/m¹ aanvulmateriaal nodig.

De hier mee samenhangende volumes voor de drie laatste profielen zijn voor 50 jaar dan respectievelijk 400, 600 en 800 m³/m¹.

Enkele opmerkingen:

- De grootste zeewaartse aanvulling bevindt zich daarbij in het gebied dat juist onderhevig is aan erosie.
- Door het verder uitbouwen zal de mate van erosie hier vermoedelijk alleen maar toenemen.
- Een en ander zal dus aanleiding geven tot significant meer onderhoud in deze kustsectie.
- Het opsluiten of beschermen van met name het kustdeel direct oostelijk van het kruishoofd lijkt in dit opzicht interessant.
- In de morfologische uitwerkingen wordt hier nog op teruggekomen.

4.5 Detailuitwerking traject Cadzand-bad

Het hier beschouwde dwarsprofielen zijn verspreid over het deeltraject Cadzand-Bad.

Een overzicht van de gebruikte randvoorwaarden is gegeven in tabel 4.6.



Nr	Km raai	Rekenpeil [m.tov NAP]		Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]
		50 jaar	100 jaar		
53	10.21	5,75	6,10	4,78	11,9
56	10.68	5,75	6,10	4,85	11,9
60	11.62	5,75	6,10	5,05	11,9
62	12.14	5,70	6,05	5,15	11,9
68	13.35	5,70	6,05	5,36	11,9

Tabel 4.6: Overzicht toekomstige hydraulische randvoorwaarden dwarsprofielen traject Cadzand-Bad.

Ook hier is gekozen voor een uniforme aanleghoogte van de zeewaartse versterking. Deze is gekozen op NAP+11 m.

Op dit traject bestaat de wens om enige extra vrije ruimte te creëren voor ruimtelijke kwaliteit en dus niet te ontwerpen op een net veilig duin. Feitelijk betekent dit dat het afslagpunt onder maatgevende condities niet achterin het duin komt te liggen maar duidelijk meer zeewaarts.

Verder is in deze eerste berekeningen uitgegaan van de veronderstelling dat het huidige duin buiten de afslagzone moet komen te liggen en dat daarmee de positie van het maatgevende afslagpunt samenvalt met de landwaartse begrenzing van de zeewaartse aanvulling.

De benodigde verschuiving voor de situatie over 50 jaar bedraagt (gegeven de veronderstelde gewenste positie van het afslagpunt!) voor de vijf profielen respectievelijk 45, 75, 55, 45 en 50 m.

Voor de situatie over 100 jaar blijkt een 10 m bredere aanvulling toereikend.

De hoeveelheid aanvulmateriaal hangt ook hier af van het niveau tot waar de aanvulling wordt aangebracht. Indien de aanvulling wordt doorgezet tot het vlakke stuk van de vooroever (op orde NAP-10 m), dient voor elke m¹ aanvulling orde 20 m³/m¹ te worden gebruikt.

5 Morfologie westkust Zeeuwsch-Vlaanderen

5.1 Inleiding

In het volgende wordt ingegaan op het morfologische systeem van de kust van west Zeeuwsch-Vlaanderen. Vervolgens worden de verschillende deelgebieden kort beschreven.

Tenslotte komen het uitgevoerde kustonderhoud en de onderliggende kustlijnposities en trends aan de orde. Eerst voor de Zeeuwsch-Vlaamse Noordzeekust, in tweede instantie in meer detail voor de relevante kustsecties (o.a. Breskens en Cadzand-Bad tot Nieuwesluis).

5.2 Noordzeekust Zeeuwsch-Vlaanderen

5.2.1 Inleiding

De kustlijn van Zeeuwsch-Vlaanderen vormt de zuidelijke begrenzing van de monding van de Westerschelde. Bij de beschouwing van de morfologie van de kust hoort dan ook een beschouwing van het mondinggebied. De kustlijn ligt in het verlengde van de Vlaamse kustlijn, met een westzuidwest-oostnoordoost oriëntatie. In deze kustlijn vormen de haven van Zeebrugge en het natuurgebied 'Het Zwin' onderbrekingen. De haven van Zeebrugge is in de huidige situatie, met twee lange havendammen en een vaargeul die door baggeren op diepte wordt gehouden, een zeer effectieve barrière voor sedimenttransport langs de kust.

Voor de kust in de Westerscheldemonding (zie figuur 5.1) loopt de geul Wielingen, die naar het westen overgaat in de geul Scheur. Ten westen van de Belgisch-Nederlandse grens ligt de ondiepte Paardenmarkt, die van de kust gescheiden werd door de getijdegeul Appelzak.

5.2.2 Grote variaties

Het gebied vanaf de jachthaven van Breskens tot het Zwin is morfologisch gezien een van de meest interessante locaties van de Nederlandse kust, vanwege de variatie in de langs- en dwarsrichting en de verschillende strandhoofden. Op grond van deze verschillen kunnen een aantal kustsegmenten worden onderscheiden.

- Breskens:
Flauw profiel tot knik, daarna steil naar geul.
- Raai 146 - 336:
Steil profiel, knik loopt weg, diepe kuil; in raai 208 en 188
- Raai 336 - 483:
Profiel met knik op NAP-2 m en daaronder extreem steil profiel, dat bij diepste gedeelte doorloopt tot NAP-30 m.
- Raai 483 - 558:
Steil profiel, zonder knik, dat steeds dieper doorloopt, van NAP-14 m bij 558 tot NAP-18 m bij raai 483.

- Raai 633:
Bol profiel in afgelopen 3 jaar (meting over strandhoofd ??)
- Raai 558 - 822:
Profiel met knik op NAP-3 á -2 m met zeewaarts steil profiel tot NAP-12 m waarbij naar het oosten het zeewaartse profiel steeds minder diep doorloopt.
- Raai 822 - 936:
Flauw profiel ter plaatse van Zwarte Polder.
- Raai 936 - 1046:
In dit segment ligt de overgang naar de Zwarte polder. Kenmerkend is het steile vooroeverprofiel.
- Raai 1046 - 1262:
Dit segment ligt in het verlengde van de volgende, dus met dezelfde oriëntatie, maar heeft een veel flauwer verlopend talud op de vooroever.
- Raai 1262 - 1412:
Kust voor Cadzand met een steil talud in de vooroever en een westzuidwest-oostnoordoost oriëntatie. In dit stuk mond de spuisluis uit, waarvan de uitwateringsgeul wordt begrensd door twee zwaar uitgevoerde stenen dammen. Verder liggen hier enkele lange strandhoofden met palenrijen. De meest steile vooroever wordt aangetroffen bij raai 1354, ter hoogte van de spuigeul. In deze raai ligt een knik op NAP -2 m in het profiel bij ongeveer 150 m uit de duinvoet. Zeewaarts van de knik verdiept het profiel in 150 meter tot NAP -10 m.
- Zwin- Raai 1412:
Overgang van het Zwin naar Cadzand, met een relatief flauw hellende vooroever en een zuidwest-noordoost oriëntatie. In het gebied liggen lange strandhoofden met bestorte koppen, met daartussen korte palenrijen.

5.2.3 Aanwezigheid paalhoofden

Op het gehele traject liggen ruim 70 paalhoofden, waarvan een belangrijk deel bestorte of bezonken koppen heeft. Paalhoofden zijn een combinatie een paalscherm met een steenbestorting, of een strandhoofd met daarop geplaatste palen [Verhagen en van Rossum, 1990].

Het effect van een paalhoofd met een verdedigde kop is in principe tweeledig:

- Het strandhoofd en het palenscherm beperken het golfgedreven langstransport van sediment;
- De verdedigde kop 'houdt' de getijstrooming uit de kust en gaat het opdringen van getijdegeulen tegen.

In het geval van een palenscherm is de effectiviteit ten aanzien van de blokkade van golfgedreven langstransport niet erg groot. Het echt dichtmaken van de openingen resulteert echter wel in een directe blokkade van de sedimentstroom.

5.2.4 Zandgolven

In de ontwikkeling van de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen wisselen perioden van voor- en achteruitgang elkaar af. Waarschijnlijk worden deze fluctuaties veroorzaakt door het

langs de kust 'lopen' van zandgolven. Zandgolven zijn ook bekend van de Zeeuwse eilanden en van de Wadden (met Vlieland als bekendste voorbeeld). Roelse en Maranus (1988) hebben de ontwikkeling van verschillende dieptelijnen geanalyseerd en gebruikt om voorspellingen te maken voor de ontwikkelingen van de kust. Hoozemans en Lambeek hebben het ontstaan van zandgolven onderzocht.

In Roelse en Maranus (1988) is de ontwikkeling van de laagwaterlijn en de ontwikkeling van de NAP -5 en -7,5 m dieptelijnen weergegeven in zogenaamde bliksemgrafieken. Vooral in de dieptelijnen van NAP -5 en -7,5 m is een duidelijk patroon in voor- en achteruitgang zichtbaar, die worden verklaard door de verplaatsing van zandgolven langs de kust. De zandgolven bij de Zeeuws-Vlaamse kust hebben vooral gevolgen op de onderwateroever maar manifesteren zich natuurlijk ook op het strand.

Bij de Zeeuwsch-Vlaamse kust ontstaan de zandgolven waarschijnlijk door het aanhechten van de zandplaat Paardenmarkt aan de kust. De locaties van deze aanhechtingen verplaatsen naar het oosten en zorgen voor de uitbouw van de kust. Volgens Lambeek vindt er nu geen zandgolfbeweging meer plaats langs de kust. Analyse van de verschilkaarten laat nog wel degelijk een sedimentatie-'vlek' zien die langs de kust naar het oosten verplaatst (in kaart 89-84 ter oosten van Cadzand, in kaart 92-89 ter hoogte van Tienhonderdpolder en in kaart 98-92 bij de Zwarte polder).

Een dergelijke zandgolf heeft ook een effect op de grote van het langstransport. Volgens Roelse (1996) is dit transport bij Cadzand in het oosten relatief groter en bedraagt hier orde 0,33 Mm³/jaar.

5.3 De monding van de Westerschelde

5.3.1 Inleiding

De kustlijn van Zeeuwsch-Vlaanderen vormt de zuidelijke begrenzing van de monding van de Westerschelde. Bij de beschouwing van de morfologie van de kust hoort dan ook een beschouwing van het mondinggebied.

De monding van de Westerschelde heeft op recente kaarten een hoofdgeul in zuid-westelijke richting (Wielingen / Scheur) en kleinere duo-geulen voor de kust van ZW-Walcheren in een overwegend noord-zuid richting. De geulen begrenzen de grote driehoekige ondiepte Vlakte van de Raan. De duo-geulen voor de kust van Zuidwest-Walcheren bestaan uit de Deurloo-oost in combinatie met de Geul van de Rassen en het Oostgat. Parallel aan deze geulen liggen langgerekte zandbanken. Op de Vlakte van de Raan liggen de nog de geulen Walvischstaart en Deurloo. Parallel aan de Wielingen ligt de geul Spleet.

In twee eeuwen is de Westerscheldemonding verandert van een drie-geulenstelsel, in de 19^e eeuw, in een twee-geulenstelsel in de 20^e eeuw [Steijn en van der Spek, 2005]. In de tweede helft van de 20^e eeuw werd dit twee-geulenstelsel nog geprononceerder. Dit was ook de periode waarin de diepte van de Scheur / Wielingen door baggerwerk werd vergroot. Vergelijken van de kaarten van 1964 met die van 2004 levert geen in het oog springende veranderingen op de geomorfologie van de Westerscheldemonding (zie ook [van Enckevoort, 1996]).

5.3.2 Geomorfologische elementen

Alle geomorfologische elementen uit 1964 zijn nog steeds zichtbaar op de kaart van 2004. Met betrekking tot de ontwikkeling van de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen wordt bij de belangrijkste elementen stilgestaan.

Wielingen

In de kaart van 1825 is zichtbaar dat de Wielingen nog dicht onder de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen lag en relatief klein was. De geul nam in grootte toe en maakte verbinding met de Scheur. De locatie van de geul verplaatste daarbij gaandeweg naar het noorden, weg van de kust. Ter hoogte van Nieuwe Sluis lagen tot 1863 nog ondieptes (respectievelijk het Bankje van Cadzand en Hompels, later Sluissche Hompels), maar vanaf 1870 verdiepte de Wielingen ter hoogte van Nieuwe Sluis.

Paardenmarkt

In het begin van de 19^e eeuw was er nog sprake van twee ondieptes voor de kust van Vlaanderen en Zeeuwsch-Vlaanderen, namelijk de Binnen Paardenmarkt en de Paardenmarkt. De Paardenmarkt was een ondiepte in de geul Wielingen, de Binnenpaardenmarkt werd van de kust gescheiden door de geul Appelzak. Aan de oostzijde verondiepte de Appelzak, zodat de Binnenpaardenmarkt daar aan de kust vastgehecht was. Dit aanhechtpunt lag in 1800 nog ter hoogte van Cadzand, maar verplaatste gaandeweg naar het oosten, zodat het rond 1860 bij Zwarte Polder lag. Vanaf 1870 is de Paardenmarkt niet meer zichtbaar in de Wielingen en is er nog maar één ondiepte. In de opname van 1920 is de geul Appelzak zodanig kleiner geworden dat de Paardenmarkt op drie plekken met de kust is verbonden. In de periode daarna verdwijnt de aanhechting tussen Paardenmarkt en kust te hoogte van Cadzand-Zwarte Polder. Na 1964 is ondiepte van de Paardenmarkt groter en ondieper geworden, het directe gevolg van het storten van baggerspecie in dit gebied. De geul Appelzak, die in 1964 nog tussen de Paardenmarkt en de kust in lag is in 2004 nagenoeg verdwenen ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens.

Appelzak

In de kaarten uit de 19^e eeuw is de Appelzak een langgerekte smalle geul parallel aan de kust van Vlaanderen. Beide uiteinde van de geul zijn ondiep, zodat daar de zandbank Paardenmarkt aan de kust hecht. Na de jaren '20 van de 20^e eeuw verandert de situatie, de geul wordt dan kleiner, het zwaartepunt verschuift naar het oosten en er ontstaat een verbinding met de geul Wielingen. De voor de hand liggende oorzaak achter deze ontwikkeling is de aanleg van de havendam bij Zeebrugge, rond 1900. In de periode na 1920 wordt de geul snel kleiner. In de kaarten van 1964 tot 2004 is zichtbaar dat dit nog steeds doorgaat.

5.3.3 Zandbalans mondingsgebied

Uit kuberingen die zijn uitgevoerd op lodingen is gebleken dat het zandvolume in het mondingsgebied van de Westerschelde afneemt. De kust van Zeeuwsch-Vlaanderen is niet het gebied waar de grote afname in de zandvoorraad van de Westerschelde-monding optreedt. In de studie van Nederbragt en Liek (2004) zijn drie balansvakken van belang voor het gebied: vak 8 tussen de Belgisch-Nederlandse grens en de Tienhonderdpolder; vak 9 met het Nederlandse deel van de Wielingen en de kust tussen de Tienhonderdpolder en Breskens en vak 3 waarin de aangrenzende Belgische kust en de Paardenmarkt en Appelzak liggen.

In het (qua oppervlak zeer kleine) vak 8 neemt de zandvoorraad toe in de periode 1970-2002. Deze toename blijkt volledig het gevolg te zijn van zandsuppleties in het gebied. Correctie voor de zandsuppleties leert dat het natuurlijke zandvolume van 1978 tot 2002 afgenomen met 4 miljoen m^3 . (oftewel een afname van bijna 170.000 m^3 /jaar)

In vak 9 is het aanwezige zandvolume in de periode 1970-2002 afgenomen met 10 miljoen m^3 . Deze afname bestaat voor een deel uit baggerwerkzaamheden (maximaal 5 miljoen m^3), die deels gecompenseerd zijn door zandsuppleties (ongeveer 2 miljoen m^3). In vak 3, ten westen van de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen is het zandvolume toegenomen met ruim 20 miljoen m^3 . Deze toename is toe te schrijven aan het storten van ruim 100 miljoen m^3 sediment in dit vak, dat voornamelijk uit de haven van Zeebrugge afkomstig is.

De zandsuppleties langs de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen leveren een positieve bijdrage aan de zandbalans van de Westerscheldemonding. Het zandvolume van het Nederlandse deel van de totale Westerscheldemonding, inclusief de kustvakken, is in de periode 1964 – 1998 met 43 Mm^3 afgenomen (Nederbragt en Liek, 2004). Het zandvolume in de Westerschelde zelf is ook afgenomen, maar wanneer gecompenseerd wordt voor de 108 Mm^3 zandwinning uit de Westerschelde over de periode 1964-1998, dan blijkt een netto zandtransport van de monding naar de Westerschelde te hebben plaatsgevonden van 45 Mm^3 . Toeval of niet, het is ongeveer gelijk aan het zandverlies van het mondingsgebied.

Het kustfundament

Vanaf 2001 wordt de zandvoorraad van de gehele Nederlandse kust aangevuld (derde Kustnota), om de zandvoorraad van het kustfundament op peil te houden. De Westerscheldemonding maakt deel uit van het kustfundament (Nota ruimte). Voor het aanvullen van de zandvoorraad van de Nederlandse kust is nog geen strategie opgesteld. Wanneer wordt uitgegaan van het vullen van de zogenaamde 'zandbakken' (Mulder, 2000) is jaarlijks in taal 2,9 miljoen m^3 zand nodig voor het aanvullen van de zandvoorraad van de het Deltagebied (van Zeeuwsch-Vlaanderen tot aan de Maasvlakte). Zandsuppleties langs de kust van Zeeuwsch-Vlaanderen leveren een bijdrage aan het op peil houden van de zandvoorraad van de Nederlandse kust.

Voor de zandhuishouding van de Westerscheldemonding is de uitwisseling met de Westerschelde van groot belang. Op grond van de meest recente zandbalans wordt verondersteld dat netto zand uit de monding naar de Westerschelde wordt getransporteerd. De sturende factor in de zanduitwisseling is het zandtekort in de Westerschelde. Het zandaanbod in de monding is niet de bepalende factor.

5.4 Nadere karakterisering deeltrajecten

5.4.1 Breskens tot Nieuwvliet

Breskens is een maritieme badplaats, onder meer door de aanwezigheid van een jachthaven met 1500 ligplaatsen. De stranden van Breskens zijn enerzijds gelegen tussen de Veerhaven en de handels- en jachthaven en anderzijds strekken zij zich in westelijke richting uit vanaf de Veerhaven tot aan Nieuwvliet. Vanaf de veerhaven richting Nieuwvliet worden de stranden steeds breder. Van Breskens tot Nieuwesluis liggen de stranden duidelijk herkenbaar tegen een Deltadijk aan, die hier deels overstoven is en daardoor een duinachtig karakter heeft.

Figuur 5.2a geeft de situatie rond Breskens-Oost weer op een topografische kaart.

Het gaat hierbij met name om het gebied tussen de oostelijke havendam van de Veerhaven (orde 350 m lang) en de westelijke havendam van de handels- en jachthaven (orde 400 m lang). De afstand tussen beide dammen bedraagt orde 900 m. De feitelijke waterkering loopt zeer dicht langs de hier aanwezige bebouwing.

Op het traject bevinden zich vier kustraaian, te weten raai 118 (in het oosten nabij de dam van de handelshaven), raai 318, raai 518 en raai 718 (in het westen nabij de dam van de Veerhaven).

Raai 118 is, aansluitend op de door het waterschap gehanteerde aanduiding, in het vervolg overigens aangegeven als raai 11 (zijnde km 0.11). Deze notatie is ook aangehouden voor de andere raaian.

Verder bevinden zich hier nog twee langere standhoofden, te weten "hoofd B" (in het midden) met een lengte van orde 400 m en het meer westelijk gelegen "hoofd 1" (lengte orde 350 m). Aan beide zijden van deze laatste dam bevinden zich nog twee kortere strekdammen. Genoemde strekdammen zijn aangelegd nog ruim voor de realisatie van de dammen bij de Veerhaven en hebben in de huidige situatie waarschijnlijk niet veel nut meer.

In het zogenaamde beheerdersoordeel wordt gemeld dat de waterkering ter hoogte van de raaian 51 en 71 (de twee meest westelijke raaian), welke in feite bestaat uit een duin met een deels overstoven duinvoetverdediging, aan de krappe kant is. In het beheerdersoordeel wordt ook gemeld dat de waterkering in deze raaian een zeer beperkte restbreedte van het duin te zien geeft. Het in rekening brengen van de extra afslag in langsricting als gevolg van de invloed van de Veerhavendam leverde voor dit kustgedeelte de score 'onvoldoende' op [Waterschap Zeeuws-Vlaanderen, 2003]. Voorjaar 2005 is hier dan ook een suppletie aangebracht [Waterschap Zeeuws-Vlaanderen, 2005].

In Breskens is het de bedoeling om, door middel van de aanleg van een nieuw strand, de zeewering tussen de oostelijke havendam van de Veerhaven en de westelijke havendam van de handels- en jachthaven zeewaarts te verleggen.

Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een aanpassing van de zeedijk in het westelijke deel en de aanleg van een duinmassief in het oostelijke deel.

5.4.2 Traject Nieuwvliet-Bad/Groede

In figuur 5.2b is een detail gegeven van dit gebied dat aan de oostzijde wordt opgesloten door de constructies bij Nieuwesluis en aan de westzijde bij het kruishoofd een eveneens hard punt kent. Het tussenliggende stuk bestaat uit een dijk en een kort stukje duin.

Westelijk van het kruishoofd bevindt zich de door duinen beschermde Ardonispolder met Nieuwvliet-Bad. Hier vinden regelmatig suppleties plaats.

5.4.3 Verdrongen Zwarte Polder

De Verdrongen Zwarte Polder, een natuureservaat, bevindt zich westelijk van Nieuwvliet-Bad en wordt aan de westzijde opgesloten door de Herdijkte Zwarte Polder. Het gebied wordt gekenmerkt door een breed en hooggelegen voorland.

Effect uitwatering op polder

Er zijn plannen om een deel van het achterland via de Zwarte Polder af te laten wateren. Op basis van de van het waterschap ontvangen informatie moet daarbij worden gedacht

aan een gebied van orde 1.000 ha. De hiertoe benodigde gemaalcapaciteit bedraagt 100 m³/minuut, ofwel (afgerond) 2 m³/s.⁴⁾ De hiermee samenhangende maximale afvoer van water zal mogelijk alleen in de winterperiode plaatsvinden. In de zomerperiode zal er in ieder geval geen of nauwelijks sprake zijn van het uitslaan van water.

In principe heeft de afvoer van water ook invloed op de Verdrongen Zwarte Polder. De geconcentreerde afvoer van water zal immers ook aanleiding geven tot enige sedimentverplaatsing. De hiermee samenhangende morfologische ontwikkeling spelen op het niveau van de kustontwikkeling echter geen rol van betekenis.

5.4.4 Cadzand-Bad

Cadzand was oorspronkelijk een eiland (landje van Cadzand) dat later door inpolderingen werd verbonden met het vasteland. Cadzand-Bad is thans een grote badplaats vlak achter de duinen met een relatief breed zandstrand. Het strand strekt zich over orde 10 km in oostelijke richting uit en sluit aan op een duingebied. Als gevolg van de Delta-werken zijn een deel van deze duinen beschermd door de nieuwe dijken. In westelijke richting sluit dit aan op het natuurgebied het Zwin.

Figuur 5.2c geeft een overzicht van dit gebied. Het gaat hierbij met name om het kustdeel tussen de westelijke geleidingsdam bij de uitwateringssluys (net westelijk van raai 1335) en de overgang naar de Verdrongen Zwarte Polder (nabij raai 985); een stuk van 3,7 km lang.

In het beheerdersoordeel van 2003 wordt geconcludeerd dat de in rekening te brengen afslag voor de raaien 1363 en 1372 (westelijk van de uitwateringssluys) reikt tot landwaarts van het kritieke afslagprofiel [Waterschap Zeeuws-Vlaanderen, 2003]. Op deze locatie is de bestaande hotelbebouwing als hoogbouw direct landwaarts van het grensprofiel aanwezig. Ook op deze locatie is in het voorjaar van 2005 een suppletie uitgevoerd.

Voor Cadzand-Bad is het de bedoeling om op het kustdeel tussen het gemaal (aan de westzijde) en ergens bij camping Hoogduin (aan de oostzijde) met behulp van strekdammen en een zandsuppletie een zeewaartse verlegging van de laagwaterlijn te bewerkstelligen.

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de aanpassing/versterking van de zeedijk in het westelijke deel en een zeewaartse versterking van het duin in het oostelijke deel. De oostelijke begrenzing valt hierbij globaal samen met hoofd nummer 15 (nabij raai 1112). In aanvulling op deze duinversterking wordt hier een behoorlijke strandverbreding voorzien.

5.5 Uitgevoerd kustonderhoud

Sinds 1990 is, conform het beleid van kustlijn handhaving, op dit kustdeel redelijk intensief gesuppleerd. Dit is nodig vanwege het feit dat er sprake was van een eroderende kust waarbij de kustlijn zich dus gestaag in landwaartse richting wil bewegen.

Het voorlaatste grotere suppletieprogramma dateert van 2001. In het totaal werd toen ruim 1 miljoen m³ extra zand aangebracht (zie tabel 5.1). De hierbinnen uitgevoerde suppleties hadden betrekking op de volgende trajecten:

⁴⁾ Betreffende getalswaarden werden per e-mail ontvangen van het waterschap op 12 juli 2006.

- Breskens (raai 31 - 71);
- Schoneveld (raai 271 - 421);
- Nieuwe Sluis-Groedse duintjes (raai 512 - 558);
- Adornispolder-Verdrongen Zwarte polder (raai 822 - 903);
- Tienhonderdpolder-Cadzand (raai 1046 -1335) en
- Cadzandbad-Zwin (raai 1354 -1487).

De suppletie bij Breskens (orde 200.000 m³) had daarbij betrekking op het westelijke deel van het kustvak Breskens-Oost.

De suppletie op het traject Tienhonderdpolder-Cadzand (orde 380.000 m³) valt geheel binnen het kustvak Cadzand-Bad. De laatste suppletie op de kust bevindt zich westelijk van de uitwateringssluus.

In het voorjaar van 2005 zijn er opnieuw suppleties uitgevoerd. In het totaal gaat het hierbij om 900.000 m³. De individuele suppleties hebben betrekking op de volgende kustvakken:

- Breskens (raai 31 - 71);
- Schoneveld (raai 271 - 352);
- Adornispolder (raai 791 - 903);
- Tienhonderdpolder-Cadzand (raai 1037 -1345) en
- Cadzandbad-Zwin (raai 1354 -1467).

Ook hier dus weer specifiek van belang de suppletie in de kom van Breskens (nu orde 120.000 m³) en die bij Cadzand (orde 200.000 m³ voor Kievitte-Oost en 100.000 m³ voor Kievitte-West).

In het totaal komt hiermee het aantal suppletiereeksen op 12 stuks. De totaal gesuppleerde hoeveelheid sediment in de periode 1988 t/m 2005 bedraagt 6,75 miljoen m³. Hiervan is overigens het grootste deel ten goede gekomen aan Breskens en Cadzand.

In tabel 5.1 is een samenvattend overzicht gegeven van het jaar van uitvoering, de hoeveelheden en de vakken. In figuur 5.3 is een en ander ook grafisch weergegeven. Hierin wordt ook melding gemaakt van een in 2003 uitgevoerde suppletie (orde 100.000 m³) op het kustvak Kievitte-West (westelijk van de uitwateringssluus). Dit zand was afkomstig van een in november/december 2003 uitgevoerde verdieping van de monding van het Zwin.

5.6 Kustlijnposities en trends

Door het jaarlijks uitvoeren van dwarsprofielopnamen wordt de tijdsontwikkeling van individuele posities langs de kust nauwkeurig gevolgd. Deze meetgegevens (de JAaRlijks KUSTmetingen) worden opgeslagen in het zogenaamde JARKUS-bestand. Uit deze gegevens kan zowel de jaarlijkse positie van de kustlijn (de zogenaamde momentane kustlijn positie; zie later), als de ontwikkeling in de tijd van deze positie (de zogenaamde trend; zie later) worden vastgesteld. De noodzaak tot het uitvoeren van het eerder beschreven kustonderhoud (de suppleties) volgt uit genoemde kustlijnposities en trends.

De JARKUS-gegevens worden gebruikt voor het bepalen van de positie van de kustlijn, de zogenaamde Momentane KustLijn (MKL). Deze MKL wordt hierbij bepaald door het volume tussen de niveaus NAP-6,8 m en NAP+3 m in beschouwing te nemen. Deze maat

moet vervolgens worden vergeleken met een vastgestelde minimale maat, de zogenaamde BasisKustLijn (BKL).

Op het moment van toetsing in 2004 (dus voor de uitvoering van de laatste suppleties) lag in het grootste deel van het kustvak de kustlijn zeewaarts van de BKL. Op slechts drie plaatsen was dit niet het geval en werd de BKL in één of enkele raaien overschreden met 1 tot 4 meter. Dit was het geval:

- bij Breskens (raai 71);
- bij Nieuwvliet-Bad (raai 877) en
- bij Cadzand (raaien 1354, 1372 en 1401).

Bij Breskens had deze overschrijding betrekking op de meest westelijke raai. De lokale BKL ligt hier relatief ver zeewaarts (op 179 m uit het referentiepunt) en leidt welhaast per definitie tot overschrijdingen. De overschrijdingen bij Cadzand hebben betrekking op het gedeelte aan de Zwin-zijde van de uitwateringssluis.

In 2005 is op een viertal gedeeltes van dit kustvak zand gesuppleerd. In de betreffende raaien is derhalve ook geen toetsing uitgevoerd. In alle andere getoetste raaien wordt de BKL nergens overschreden.

Nabij Breskens (raai 11 t/m 251) is, op een enkele raai na, zelfs sprake van lichte kustuitbouw (afstand TKL-BKL varieert hier tussen 20 en 40 meter). Westwaarts van de tussen raai 271 en 325 uitgevoerde suppletie richting de Groedse Duintjes, t.p.v. raai 373 t/m 530, wordt de afstand TKL-BKL kleiner.

Verder naar het westen (tot aan de uitgevoerde suppletie vanaf raai 791 en dus westelijk van het Kruishoofd) laat de ontwikkeling van de MKL (de trend) een wisselend beeld zien: in het oostelijk deel (raai 558 t/m 663) is deze positief met 1 meter per jaar, terwijl deze in het westelijk deel direct oostelijk van het kruishoofd (raai 684 t/m 778) negatief tot circa 2,5 meter per jaar is. In het oostelijke deel ligt de TKL tot circa 40 meter zeewaarts t.o.v. de BKL, terwijl de afstand TKL-BKL in de twee meest westelijk gelegen raaien minimaal is. Op termijn zal oostelijk van het kruishoofd dus onderhoud noodzakelijk zijn.

Tot aan de meest westelijk uitgevoerde suppletie (raai 1046 t/m 1427) ligt de TKL met circa 50 meter ruim zeewaarts t.o.v. de BKL.

Ter plaatse van raai 951 ligt een dam parallel aan de kust. Ten oosten van deze raai, in de monding van de Zwartepolder, treedt erosie op van circa 6 meter per jaar en ten westen van die dam (raai 962 t/m 993) is enige aanzanding berekend tot circa 2 meter per jaar. T.p.v. raai 1007 t/m 1032 is kusterosie berekend tot circa 4 meter per jaar. Ten westen van de suppletie (omgeving Zwinmonding) t.p.v. raai 1450 t/m 1487 treedt kusterosie op tot circa 2 meter per jaar. De BKL wordt hier echter nog niet onderschreden.

Ontwikkelingen en trends

Naast de zogenaamde MKL is ook de tijdsontwikkeling van deze positie van belang. De mate waarin deze positie voor of achteruitgaat wordt aangegeven met de zogenaamde trend, uitgedrukt in m/jaar.

Figuur 5.4 geeft een overzicht van de aanwezige trends. Hierin is op de verticale as de trend uitgezet als functie van de positie in het kustvak; het raainummer op de horizontale as. De raainummers zijn hierbij aflopend weergegeven zodat het Zwin links (west) ligt en Breskens rechts (oost).



Voor het gehele kustvak is blijkbaar sprake van een negatieve, landwaarts gerichte, trend over het grootste deel van dit kustvak. Het grootste is deze in de sectie Schoneveld (raai 270 - 300 en in de secties Tienhonderdpolder en Cadzandbad-Zwin (tussen 2 en 3 meter per jaar).

In dit laatste traject (tussen raai 1046 en 1335) is de handhaving van de BKL niet alleen van belang in het kader van erosiebestrijding, maar ook voor het waarborgen van de veiligheid van het achterland.

Aanzanding vindt alleen plaats ter hoogte van Breskens, in de luwte van het havenhoofd naar de Veerhaven (raai 146 - 188), tussen Nieuwesluis en Nieuwvliet Bad (raai 584 en 705) en bij Verdrongen- en Herdijkte Zwartepolder (raai 962-979). Hier is de trend van de kustlijnligging zeewaarts gericht, tussen 0 en 2 meter per jaar. De hier aanwezige (eind)constructies leiden blijkbaar tot een blokkade van het oostwaarts gerichte sedimenttransport.

In aanvulling op de huidige trend (die van 2005) zijn in de grafiek ook de waarden voor 2003 en 2002 opgenomen. Deze sluiten redelijk aan bij de 2004-waarden en bevestigen daarmee het algemene beeld.

In tabel 5.1 zijn de onderliggende getalswaarden samengebracht [RWS, 2006]. In deze tabel zijn ook de BKL-waarden toegevoegd.

6 Nadere morfologische analyses

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten gepresenteerd van de voor de relevante deelsecties uitgevoerde gedetailleerde morfologische analyses.

Achtereenvolgens komen daarbij aan de orde:

- Het kustvak bij Breskens-Oost;
- Het kustdeel bij Cadzand-Bad;
- Het kustdeel Nieuwvliet-Bad – Groede.

De resultaten van deze analyse zijn van belang voor de definitie van een geschikte vormgeving van zeewaartse versterkingen en vormen bovendien het startpunt voor de opzet van het voor het traject Cadzand- Nieuwesluis gebruikte morfologische model.

6.2 Kustvak Breskens-Oost

6.2.1 Ontwikkeling dwarsprofielen

Binnen de kom van Breskens zijn vier JARKUS-raaien gedefinieerd, te weten raai 11 (in het oosten), 31, 51 en 71 (in het westen).

In figuur 6.1 is een overzicht gegeven van de in deze raaien in de laatste jaren aanwezige dwarsprofielen. De bovenste figuur heeft hierbij betrekking op profielen voor 2003, de onderste op de dwarsprofielen van 2005.

De dwarsprofielen zelf vertonen onderling niet erg veel overeenkomst of het moet zijn dat voor alle vier geldt dat er aan de zeezijde (links) sprake is van een vrij abrupte overgang naar een relatief dieper gelegen deel van het dwarsprofiel (met name in raai 11) en aan de rechterzijde de aanwezigheid van een ruim 12 m hoge waterkering.

Op het eerste gezicht lijken de situaties in de verschillende jaren vergelijkbaar. In hoeverre dit inderdaad zo is, kan worden vastgesteld aan de hand van de in figuur 6.2a/b weergegeven dwarsprofielontwikkelingen.

Meest oostelijke raai (raai 11)

De tijdsontwikkeling in de meest oostelijke raai (raai 11) is gegeven in de bovenste afbeelding van figuur 6.2a. Hierin valt op dat de overgang naar het diepere stuk als vrij stabiel kan worden aangemerkt. De profielen zijn hier in de periode 1994 t/m 2005 nauwelijks gewijzigd.

De rest van het profiel wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een relatief vlakke vooroever met een helling van orde 1 : 100. Op het hogere deel blijkt hier sinds 2001 sprake te zijn van een zekere aangroei van het profiel. Deze groei heeft te maken met in 2001 in dit gebied uitgevoerde suppletie. Toen is op het traject km 0,17 – 0,89 (dus westelijk van de beschouwde raai) in totaal bijna 200.000 m³ gesuppleerd. In 2005 is hier opnieuw 120.000 m³ in het systeem gebracht.

Het duin lijkt overigens ook enigszins te hebben geprofiteerd van laatstgenoemde aangroei. Uit een analyse van de tijdsontwikkeling van het duinvolume (tussen RSP-15 m en RSP+10 m) blijkt dat er in de periode 1995 tot en met 2005 sprake is van een aangroei van maar liefst 17 m³/m¹/jaar. Meer westelijk bedraagt deze aangroei slechts 3 m³/m¹/jaar. Het grote verschil wordt hierbij natuurlijk verklaard door het hier aanwezig zijn van een zeer breed droog strand.

Raai (raai 31)

De ontwikkeling in raai 31 (onderste afbeelding in figuur 6.2a) is enigszins vergelijkbaar. Ook hier een stabiele overgang naar het diepere deel. Er is sprake van een nog iets flauwer hellende vooroever (orde 1 : 150 in plaats van 1 : 100) en ook hier is het effect van de in 2001 aangebrachte suppletie duidelijk zichtbaar. Daarbovenop komt nog de suppletie van 2005.

Raai (raai 51)

Het dwarsprofiel in raai 51 (zie bovenste plot in figuur 6.2b) laat ook de effecten van de aangebrachte suppletie zien. Voor de rest zijn er eigenlijk geen significante ontwikkelingen waarneembaar of het moet het duidelijk waarneembare resultaat zijn van de 2005-suppletie.

Meest westelijke raai (raai 71)

De figuur voor raai 71 laat ook de in 2001 aangebrachte suppletie duidelijk zien. De dwarsprofielen van de daaropvolgende jaren laten echter zien dat de toen aangebrachte suppletie hier geleidelijk weer aan het verdwijnen is. Ook hier is de in 2005 aangebrachte suppletie weer duidelijk aanwezig.

Verder is de helling van de vooroever hier weer iets steiler. Deze is, vergelijkbaar met de vooroever in het meest oostelijke dwarsprofiel, orde 1 : 100.

De overgang naar het diepere deel kan ook hier als stabiel worden aangemerkt. Er is wel een behoorlijke variatie op de diepere vooroever aanwezig. Een nadere analyse van de volumeontwikkeling in dit deel van het profiel laat overigens zien dat geen sprake is van enige significante trend.

6.2.2 Lokaal morfologisch systeem

In figuur 6.3 zijn de detailontwikkelingen in de verschillende raaien samengebracht. Hierin is duidelijk de migratie van de in 2001 aangebracht suppletie waarneembaar.

In de onderste figuur is te zien dat de in het westelijk deel aangebrachte suppletie (voor het eerst zichtbaar in de profielopname van 2002) aan erosie onderhevig is. De NAP+2 m contour verplaatst zich in de periode 2002 – 2004 over circa 50 m in landwaartse richting. Ter plaatse van raai 51 lijkt er weinig aan de hand. Blijkbaar ligt deze raai centraal tussen de eroderende profielen in het westen en de aanzandende dwarsprofielen in het oosten; een soort kantelpunt. In de profielen 31 en 11 is er duidelijk sprake van een afzetting van de uit het westen afkomstige zandaanvoer.

De toekomstige ontwikkeling van de in 2005 aangebrachte suppletie is weliswaar nog niet gemeten, maar deze zal zich waarschijnlijk op een soortgelijke wijze door het systeem verplaatsen.

Dit beeld wordt nog eens bevestigd door de in figuur 6.4a gegeven tijdsontwikkeling van de MKL-posities. In deze figuur is de positie van de kustlijn (de MKL-waarde) uitgezet als functie van de tijd. Dit is gedaan voor alle vier raaien.

Het effect van de in 2001 aangebrachte suppletie is duidelijk herkenbaar in de grafiek. Na 2002 is er als gevolg van eerder genoemd verlies echter weer een teruggang in de MKL-positie. Voor de oostelijk gelegen raaien is dit niet zo en resulteert de winst in een zeewaartse verplaatsing van de kustlijn.

Een soortgelijk beeld is gegeven in de bovenste figuur van figuur 6.4b, waarin de ontwikkeling van de NAP+2 m contour is gegeven.

Blijkbaar sluit de vormgeving van de aangebrachte suppletie niet aan bij de karakteristieken van het natuurlijke systeem.

Dit laatste is goed te zien in de onderste figuur van figuur 6.4b waarin de NAP+2 m contour op verschillende tijdstippen is gegeven. De belijning van de 2001-suppletie (gekaracteriseerd door de 2002-contour) wijkt af van de natuurlijke evenwichtsbelijning. Het gevolg is dus dat het verstoorde systeem zich zal herschikken en zal trachten te migreren naar de oorspronkelijke vorm.

6.2.3 Consequenties t.a.v. mogelijke versterking

Gegeven de resultaten van de morfologische analyse kan worden geconcludeerd dat de grotere morfologische veranderingen binnen het kustvak primair het gevolg zijn van het verstoren van het evenwichtssysteem. Het uitvoeren van een suppletie met een niet op het natuurlijke systeem aansluitende belijning maakt dat het systeem zich zal herschikken.

Voor een versterking moet dan ook aanbeveling goed rekening worden gehouden met de evenwichtskkenmerken van het morfologische systeem. Op deze wijze kan een morfologisch stabiele situatie worden verkregen waarbij er slechts beperkt onderhoud nodig zal zijn.

Dit onderhoud zou hoogstens betrekking moeten hebben op de compensatie van het verlies van materiaal dat door wind richting waterkering wordt verplaatst.

Uit een nadere analyse van de dwarsprofielopnamen, waarbij gekeken is naar de aangroei van het duinprofiel boven de duinvoet, blijkt het hierbij in de afgelopen jaren ging om orde $10 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$. In het totaal voor het betrokken kustvak dus enkele duizenden m^3 per jaar.

6.2.4 Voorgestelde ingrepen

In figuur 6.5 is het in de kom van Breskens aanwezige morfologische systeem nog eens schetsmatig weergegeven.

Het aanbrengen van een suppletie in het westelijke deel leidt tot een verlies van materiaal in dit deel van het kustvak en daarmee tot een aanvoer van materiaal in het rechterdeel. In deze figuur is ook de stabiele oriëntatie van de lokale kustlijn gegeven.

Compartimentering

Gezien de evenwichtsoriëntatie van de kustlijn kan onderscheid worden gemaakt tussen maatregelen in het oostelijke en maatregelen in het westelijke deel.

Aanbevolen wordt om een compartimenteringsdam aan te leggen teneinde de harde constructie aan de westzijde te scheiden van de strand/kustuitbouw aan de oostelijke zijde. Op deze wijze kan een versterking van het westelijke deel worden uitgevoerd zonder dat dit direct leidt tot een verlies van materiaal naar het oostelijke deel (zie ook figuur 6.6).

Op het rechterdeel kan door het zeewaarts uitbouwen van het duin eenvoudig een uitwaartse verplaatsing van de waterkering worden verkregen. Op deze wijze kan de wettelijke achterkant van de waterkering over tenminste 50 m worden opgeschoven.

Indien ook het strand in deze zone wordt uitgebouwd zal leiden tot (meer) verlies van materiaal richting ingang van de Handelshaven. Teneinde dit tegen te gaan en de kustlijn aan de oostelijke zijde op te sluiten kan hier een opsluitdam worden aangelegd.

In deze situatie lijkt het kustvak morfologisch stabiel, waardoor er slechts beperkt onderhoud nodig zal zijn. Dit beperkte onderhoud is in ieder geval nodig ter compensatie van het verlies richting waterkering (door wind). Dit laatste verlies bedroeg in de afgelopen jaren orde $10 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$ (in het totaal dus orde enkele duizenden m^3 op jaarbasis).

Een en ander geeft dus aan dat er voldoende mogelijkheden zijn voor het verplaatsen van de waterkering. De ruimte die nodig is voor het veiligstellen van de waterkering is (zeker bij het gebruik van iets grover zand) immers beperkt.

Aandachtspunten hierbij zijn dus nog het ontwerp van de noordoostelijk opsluitconstructie alsmede de aansluiting van het hoge duin op de relatief lage dam van de handelshaven.

6.3 Traject Cadzand-Bad - VZP

6.3.1 Ontwikkeling dwarsprofielen

Vergelijkbaar met de uitwerking voor Breskens zijn ook voor Cadzand-Bad de gemeten dwarsprofielen aan een nadere analyse onderworpen.

Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de dwarsprofielen in het centrale deel van het kustvak en de dwarsprofielen in de aanliggende secties; westelijk richting het Zwin en oostelijk richting de Verdrongen Zwarte Polder.

In figuur 6.7 zijn de dwarsprofielen (in dit geval uit 2005) gegeven voor het centrale deel van Cadzand-Bad. De bovenste figuur geeft de dwarsprofielen in het oostelijke deel (raaien 1112 – 1214), de onderste figuur die van het westelijk deel (raaien 1262 – 1335). In alle gevallen is er sprake van een op het duin aansluitend strand met een helling van orde 1 : 40. Ter plaatse van raai 1335 (nabij de uitwateringssluis) is dit profiel overigens relatief mager.

De helling van de vooroever bedraagt in het westelijke gedeelte ongeveer 1 : 20. Meer oostelijk is er sprake van een flauwere helling. Het niveau van het diepere kustprofiel bedraagt orde NAP-10 m. Voor de meest oostelijke raai is deze iets lager.

Laatstgenoemde versteiling van de vooroever is ook waarneembaar in de bovenste figuur van figuur 6.8 waarin de dwarsprofielen zijn gegeven voor het aanliggende deel van de kust (raaien 993 -1092). Hier is het strand relatief smal en gaat het profiel vrij snel over naar een diep gelegen vooroever. Dit sluit ook aan bij de positie van de dieptecontouren zoals deze zijn gegeven in figuur 5.2c. De NAP-10 m dieptelijn buigt hier sterk af richting kust.

In de onderste plot van figuur 6.8 zijn de dwarsprofielen gegeven voor het kustdeel westelijk van de uitwateringssluis. Zeker op het eerste stuk zijn de duinen niet robuust (is ook de reden voor het regelmatige suppletieonderhoud).

In de figuren 6.9a/b is voor een viertal dwarsprofielen in het centrale deel de tijdsontwikkeling van de dwarsprofielen gegeven. Het gaat hierbij om de oostelijke raaien 1136 en 1191 en de westelijke raaien 1282 en 1318.

Uit de figuren blijkt dat er geen sprake is van significante ontwikkelingen. Het hoger gelegen kustdeel (strand en duin) oogt redelijk stabiel. Wel valt op dat de incidenteel herkenbare suppleties (feitelijk te zien als een verstoring van het natuurlijke dwarsprofiel) snel worden verspreid over het profiel en daarmee ook niet meer als zodanig herkenbaar zijn.

In de figuren is ook de positie van de voorzijde van de verschillende strandhoofden aangegeven (de koppen van de hoofden). De aanwezigheid van deze strandhoofden zorgt in combinatie met het hier uitgevoerde kustonderhoud voor de als gemiddeld stabiel te kenmerken situatie.

In aanvulling op de eerdere dwarsprofielen is in figuur 6.10 ook nog een detail geven van de beschouwde profielen. Deze geeft echter geen aanvullende informatie over het morfologisch systeem.

Figuur 6.11 geeft de tijdsontwikkeling van de MKL. In deze figuur zijn de momenten waarop een suppletie is uitgevoerd (zie figuur 5.3) zeer duidelijk herkenbaar in de positie van de individuele MKL-waarden.

6.3.2 Morfologisch systeem

Zoals blijkt uit de in figuur 3.2 weergegeven trends, vertoont de kust bij Cadzand-Bad thans een gemiddelde achteruitgang van 2 tot 4 m per jaar.

Het hiermee samenhangende volumeverlies kan worden berekend als het product van de werkende hoogte van het erosieprofiel (zeg van NAP-8 m tot het duinfront op NAP+5 m; dus orde 13 m), de lengte van het kustvak (tussen Hoogduin en de uitwateringssluis; orde 2,5 km) en het gemiddelde verlies (zeg 3 m/jaar).

Dit levert een gemiddeld verlies op van $13 \times 2.500 \times 3 = 97.500 \text{ m}^3/\text{jaar}$; afgerond dus orde 0,1 miljoen m^3 per jaar. Per strekkende meter kust bedraagt het verlies orde $40 \text{ m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$.

Teneinde deze achteruitgang te compenseren worden regelmatig suppleties uitgevoerd. De totale omvang van de op dit kustvak uitgevoerde suppleties bedraagt (in de periode 1988 tot 2005) 3,8 miljoen m^3 (zie tabel 5.1).

Hiervan heeft orde 2,0 miljoen m^3 betrekking op het gedeelte oostelijk van de uitwateringssluis tot Hoogduin. Uitgaande van een nuttig effect van de thans uitgevoerde suppletie tot 2008 (bij een herhalingstijd 3 a 4 jaar) is er dus 2,0 miljoen m^3 over een periode van 20 jaar aangebracht: gemiddeld dus $2,0 / 20 = 0,1$ miljoen m^3 per jaar. Deze waarde komt overeen met de grootte van het eerder gekwantificeerde verlies.

Indien ook de omgeving van het centrale deel van het kustvak in beschouwing wordt genomen, neemt de absolute grootte van het verlies toe tot orde 0,2 miljoen m^3 per jaar. Dit verlies hangt samen met de enigszins geprononceerde ligging van dit deel van de kust en het feit dat hier, over het jaar gemiddeld, sprake is van een enigszins scheef invallende golfaanval.

Uit een verkennende studie naar het maatgevende golfklimaat blijkt dat er sprake is van een dominante golfhoogte welke onder een hoek van orde 10 graden de kustlijn bereikt. Ofschoon deze uitwerking feitelijk veel gedetailleerder zou moeten zijn kan deze indicatie wel worden gebruikt voor een eerste verkenning van de hiermee samenhangende effecten.

Een dergelijke scheef invallende golf levert een netto sedimenttransport in noord-oostelijke richting langs de kust. De bijbehorende grootte van het sedimenttransport bedraagt orde $0,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Dit getal komt qua orde-van-grootte overeen met het eerder genoemde verlies voor het totale kustvak.

Het echte langstransport is overigens een combinatie van dit golfgedreven transport en het transport onder invloed van het netto horizontale getij. Ten aanzien van de grootte van het netto getijgedreven transport is feitelijk geen bruikbare informatie voorhanden.

In de huidige situatie spelen de aanwezige strandhoofden en paalrijen overigens een belangrijke rol. Door de aanwezigheid van deze constructies wordt de getijstroom enigszins uit de kust gedrukt en daarmee wordt de grootte van het hiermee samenhangende sedimenttransport beperkt. Dit geldt in het bijzonder voor de zogenaamde opwoelcomponent van het getijgedreven transport (het feit dat door de aanwezigheid van de golfwerking extra materiaal in suspensie wordt gebracht dat vervolgens door de netto getijstroom wordt verplaatst). Indien deze constructies er niet zouden zijn zou het totale netto transport groter zijn. Dit zou kunnen leiden tot een verdubbeling van het netto transport tot orde 0,4 Mm³/jaar. Zonder goed inzicht in de werkelijk optredende transporten is een dergelijke schatting echter aan grote onzekerheid onderhevig.

6.3.3 Consequenties t.a.v. mogelijke versterking

Uit de morfologische analyses volgt dat er langs dit deel van de kust sprake is van een doorgaande erosie. Ook op termijn zal daarom rekening moeten worden gehouden met het uitvoeren van noodzakelijk kustonderhoud. Het thans optredende verlies bedraagt 0,1 tot 0,2 miljoen m³ per jaar.

De aanwezige strandhoofden dragen er in feite toe bij dat het verlies niet groter is dan deze waarde. Het verwijderen van de hoofden en/of het zeewaarts uitbouwen van de kust tot voorbij deze hoofden maakt dat deze reducerende bijdrage (deels) verdwijnt en dat daarmee de grootte van het te compenseren verlies zal toenemen. Zoals reeds eerder gemeld neemt het belang van met name het getij-gedreven transport toe en daarmee ook de behoefte om hier meer kwantitatief inzicht in te hebben.

Voor het ontwerp zijn er feitelijk twee categorieën te onderscheiden, namelijk een uitwerking waarbij er rekening wordt gehouden met de verminderde werking van deze constructies en een uitwerking waarbij ook de constructies worden aangepast of uitgebouwd. Genoemde uitwerkingen hebben daarbij respectievelijk betrekking op de zachte (zonder constructies) en de harde variant (met ondersteunende constructies).

6.3.4 Voorgestelde ingrepen

De mogelijke ingrepen kunnen worden afgezet tegen het aanwezige morfologische systeem. De totale balans wordt primair gestuurd door het netto transport dat aan de oostzijde het balansgebied verlaat. Dit verlies wordt geschat op 0,1 tot 0,2 miljoen m³ per jaar. De grootte van de (positief of negatieve) uitwisseling met dieper water (over de NAP 10m dieptelijn) is onduidelijk.

De toevoer van materiaal aan de westelijke zijde lijkt beperkt. Dit wordt onderschreven door de beperkte gevuldheid van het direct oostelijk van de uitwateringsluis gelegen kustvak. De indruk bestaat bovendien dat de westelijk gelegen raaien materiaal richting het Zwin verliezen.

Mogelijkheden zeewaartse uitbouw

In principe zijn er voor het zeewaarts uitbouwen van de kust bij Cadzand-Bad in principe twee verschillende mogelijkheden, te weten:

1. Het uitbouwen van de kust door eenvoudigweg extra te suppleren (in feite dus door het zeewaarts verplaatsen van de basiskustlijn). Dit betreft de zogenaamde volledig *zachte* oplossing;
2. Het zeewaarts opschuiven van de huidige kustlijn door het hele profiel (samenhangend geheel van profielvorm en hierin aanwezige constructies) op te schuiven. Dit betreft een zogenaamde *harde* oplossing.

Zacht – zonder (extra) constructie

Het op een zachte wijze uitbouwen van de kust lijkt in principe goedkoop. De consequentie is natuurlijk wel dat, door het veel minder tot niet meer efficiënt werken van de verschillende constructies, het netto transport zal toenemen en daarmee ook het zijwaartse verlies van sediment groter zal zijn. De benodigde onderhoudsinspanning zal dus per definitie hoger zijn dan de huidige. Ofschoon een deel van dit extra transport ten goede komen aan de BKL-zone in de aangrenzende, meer oostelijk gelegen kustvakken zal dit wel leiden tot afname van het aldaar benodigde onderhoud. Een ander deel van het suppletievolume 'verdwijnt' in het systeem en zal niet ten goede komen aan de kustlijnhandhaving elders. Het zand kan echter wel ten goede komen aan het zogenaamde kustfundament en wellicht op indirecte wijze alsnog bijdragen aan het kustonderhoud.

Het huidige onderhoud bedraagt orde $0,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ waarvan $0,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ voor het centrale deel. Dit onderhoud zal (bij geforceerde instandhouding van de uitbouw) toenemen. Het verlies is enigszins afhankelijk van de grootte van de uitbouw, maar vooral van de vormgeving van de overgang naar de thans aanwezige kustlijnligging. Ter plaatse van de met name de oostelijke overgang is immers per definitie sprake van een extra groot netto sedimenttransport. Dit zal vragen om een extra suppletieinspanning op met name de hoek van de uitbouw. Initieel kunnen deze verliezen behoorlijk oplopen. Wel is het daarbij zo dat het extra suppleren van het centrale, uitgebouwde deel van de kust geleidelijk zal leiden tot een situatie waarbij de transportgradiënten minder geprononceerd worden en er dus minder onderhoud nodig zal zijn. Bovendien zal al het extra toegevoegde materiaal ten goede komen aan de rest van het kustvak, waar dus weer minder gesuppleerd hoeft te worden.

Feitelijk is op dit erosieve kustvak alleen de extra suppletiebehoefte van belang. Uit verkennende berekeningen (zie volgende hoofdstuk voor meer details) blijkt dat deze orde $0,1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (bij een beperkte uitbouw) tot $0,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (bij een grotere uitbouw) bedraagt. Een en ander is echter wel sterk afhankelijk van de beschouwde periode.

Conclusie: Door het wijzigen van de belijning van de kustlijn zal het transportpatroon wijzigen waardoor er extra gradiënten in het transport aanwezig zullen zijn.

Hard – met (extra) constructie

In het geval van een harde oplossing en het opschuiven van het totale dwarsprofiel is er morfologisch gezien weinig verschil met de huidige situatie.

De verliezen zijn hoogstens iets groter dan de huidige waarden in verband met iets grotere zeewaartse verliezen. Indien echter de schijf-aanvulling tot orde NAP-10 m (zijnde de overgang tot het vlakke voorland) wordt doorgezet is dit veel minder tot niet aan de orde.

In een basisvariant kunnen in deze optie alle thans aanwezige strandhoofden opgehoogd en in zeewaartse richting uitgebreid. In plaats het aanpassen van alle aanwezige constructies is het ook mogelijk om slechts een beperkt aantal constructies aan te pakken. De blokkade van het transport kan initieel aanleiding geven tot enige extra erosie in het oostelijke kustdeel. Dit lijkt in dit specifieke geval minder erg daar in dit gebied juist een landwaartse verlegging van de waterkering is voorzien.

In de stabiele eindsituatie zal overigens het jaarlijkse verlies weer langzaam terugkeren naar de thans ook aanwezige ($0,1$ tot) $0,2$ miljoen m^3 per jaar. De kust ligt dan alleen op de gewenste afstand verder zeewaarts. Initieel zal er, afhankelijk van de gekozen belijning en de positie van de aangepaste BKL, nog veel extra onderhoud nodig kunnen

zijn. Dit beginverlies kan echter significant worden beperkt door het aanleggen van een reeds zoveel mogelijk stabiele vormgeving.

Hierbij moet overigens worden opgemerkt dat de uitbouw van relatief korte dammen op deze locatie geen aanleiding geeft tot een zeer omvangrijke beïnvloeding van het morfologische systeem. Indien er bijvoorbeeld sprake zou zijn van de aanwezigheid van een stroomvoerende geul, dan zou het uitbouwen van constructies kunnen leiden tot een extra stroomcontractie en allerlei ongewenste neveneffecten (verdiepingen bij de hoofden van de dwarsdammen). In een dergelijke situatie verdient een harde oplossing dan ook zeker niet de voorkeur [Alkyon, 2005]. Gezien de vormgeving van de aanwezige vooroever en het ontbreken van een echte geul speelt dit bezwaar hier echter in veel mindere mate en blijft een oplossing met verlengde strandhoofden dan ook expliciet in beeld.

Voor het verkrijgen van een situatie met slechts marginaal onderhoud op het kustvak Cadzand-Bad zijn veel zwaardere en vooral langere constructies (omvangrijke dammen) nodig. Deze grijpen zeer fundamenteel in in het morfologische systeem en moeten dan ook als niet haalbaar/ongewenst worden aangemerkt.

Een verdere uitwerking kan pas aan de hand van een meer gedetailleerde morfologische studie worden geformuleerd. Niet alleen de eindsituatie maar ook de fasering van de werkzaamheden (wat, waar, wanneer en in welke volgorde) speelt dan een rol.

Nadere kwantificering en afweging

Het feit dat er bij de zachte optie geen constructies behoeven te worden aangelegd maakt dat de keuze voor deze optie wellicht meer voor de hand ligt. Voor het betrokken (vrij geprononceerd gelegen) kustvak betekent dit echter een toename van de verliezen en daarmee ook een negatieve beïnvloeding van de aanzanding van de Verdrongen Zwarte Polder. De aanzanding neemt hier immers toe.

Het ondersteunen van de uitbouw met enkele constructies is initieel duurder, maar levert op termijn wellicht voordelen op en kan een gunstig effect hebben op de naastliggende kustvakken. Er is dan immers sprake van een verminderde zandaanvoer naar deze kustvakken. Daar de waterkering in het aanliggende oostelijke kustvak naar achteren wordt verlegd is erosie hier een minder groot probleem.

Voor het daadwerkelijk meer gedetailleerd in kaart brengen van de effecten van de beide uitvoeringsvarianten is een op de lokale situatie toegespitst morfologisch model operationeel gemaakt. De voorliggende situatie met een groot getijverschil en gedeeltelijk inactieve constructies is immers relatief complex. De nadere uitwerking van deze modellering is gegeven in de volgende hoofdstukken.

7 Morfologisch model Zwin-Nieuwesluis

7.1 Inleiding

Uit de eerdere morfologische analyses komt naar voren dat er voor het traject Zwin – Nieuwesluis behoefte bestaat aan een meer kwantitatieve uitwerking van het met de verschillende varianten samenhangende kustonderhoud.^{*)} Hiertoe is gebruik gemaakt van een morfologisch model concept, het zogenaamde PONTOS-model.

In het volgende komen, na een korte toelichting op het modelconcept, achtereenvolgens aan de orde:

- Uitgangspunten en aanpak;
- Definitie modelopzet
- Specificatie gebruikte invoer;
- De afregeling en validatie van het model;
- Procedure voorspellingen.

De resultaten van de relevante berekeningen komen vervolgens in het volgende hoofdstuk aan de orde.

7.2 Het gebruikte rekenmodel: PONTOS

7.2.1 Het ontwikkeltraject

In opdracht van RWS/RIKZ wordt sinds 1996 in een aantal etappes gewerkt aan de ontwikkeling van een grootschalig morfologisch model voor de Nederlandse Noordzeekust (zie o.a. [Alkyon/WL, 1998], [Alkyon/WL, 1999] en [Alkyon/WL, 2004a/b]). Dit zogenaamde PONTOS-model is geschikt om de ontwikkeling van de kust voor verschillende klimaat- en managementscenario's te simuleren. Op basis hiervan kan onder andere een inschatting worden verkregen omtrent het op termijn benodigde kustonderhoud.

7.2.2 Beschikbare versies

In een eerste versie van het PONTOS-model was het alleen mogelijk om een ononderbroken kustlijn te simuleren. Interacties met bijvoorbeeld zeegaten (en de daaraan gerelateerde delta's) waren daarbij nog niet mogelijk.

In een latere versie van dit PONTOS-model (versie 2.0) maakte ook de ontwikkeling van de onderbroken kust en de achtergelegen getijdebekkens onderdeel uit van de modellering. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van dit laatste PONTOS/ASMITA-model kan worden verwezen naar de betreffende onderzoeksrapportage [Alkyon/WL, 2004a].

De toepassing van dit model heeft zich in het kader van deze laatste studie gericht op de Nederlandse Noordzeekust. De kustlijn tussen Cadzand en Rottumerplaat is hierbij gesimuleerd binnen één applicatie. Deze applicatie binnen het PONTOS-model is het zogenaamde NL-KUST-model. Deze toepassing is uitgebreid beschreven in deel 2 van het betreffende onderzoeksrapport [Alkyon/WL, 2004b].

^{*)} In eerste instantie had dit morfologische model alleen betrekking op de kuststrook bij Cadzand-Bad. In een later stadium is alsnog besloten om het model in oostelijke zin uit te breiden tot iets oostelijk van Nieuwesluis.

Bij de thans met dit model uitgevoerde simulaties gaat de aandacht voornamelijk uit naar de ontwikkelingen op een termijn van 50 jaar. In een recent opgestarte studie worden nu ook de grootschalige ontwikkelingen op veel langere termijn (tot zelfs 200 jaar) in beschouwing genomen [Alkyon/WL, 2006]. Naast het reguliere onderhoud van de kustlijn, kunnen met deze laatste versie van het model (versie 2.2) ook zogenaamde systeemsuppleties worden gekwantificeerd. Deze suppleties hebben ten doel de hoeveelheid zand binnen het kustfundament in stand te houden.

Binnen het voorliggende onderzoek wordt gebruik gemaakt van de functionaliteit van versie 2.2 van het rekenmodel. Binnen deze versie van het model is ook het zogenaamde BKL-onderhoud geïmplementeerd. Hier komen we later nog uitgebreider terug.

7.2.3 Geschiktheid model

De thans voorliggende vraagstelling laat het gebruik van het PONTOS-rekenmodel toe. Er moet immers worden gewerkt aan een beoordeling van verschillende varianten waarin ook de samenhang tussen de lokale oplossingen op de grotere schalen tot uitdrukking moet komen. Voor wat betreft de ruimteschaal moet daarbij nu dus worden ingezoomd op het kustdeel rond Cadzand-Bad.

Afregeling

In afwijking tot andere (plan)studies kan hierbij niet meer worden gewerkt met de afregeling van de zogenaamde NL-KUST-toepassing van het model. Het model zal dus specifiek voor deze situatie moeten worden afgeregeld. Op deze specifieke afregeling wordt verderop nog uitgebreider teruggekomen.

Dwars- en langstransporten

In het PONTOS-model is zowel het dwarstransport als het langstransport op een zo goed mogelijke wijze gemodelleerd. Het netto dwarstransport is daarbij zodanig afgeregeld dat er sprake is van een dynamisch stabiele situatie. Door het aanbrengen van extra materiaal in de bovenzijde van het dwarsprofiel (door bijvoorbeeld suppleties), zal er daarmee automatisch een extra aandrijving plaatsvinden van het netto zeewaarts gerichte dwarstransport. Als gevolg hiervan zal een deel van het extra aangebrachte materiaal dus door een combinatie van langs- en dwarsgradiënten uit het bovenste deel van het kustprofiel verdwijnen. De verdeling over beide componenten is van een veelheid van factoren afhankelijk. Nadere analyse van een aantal (in een ander kader) uitgevoerde simulaties laat zien dat de netto verliezen in hoofdzaak in kustlangse richting plaatsvinden. Het aandeel van het dwarsverlies is orde 1/10 tot 1/4 van het totale verlies, dit afhankelijk van de beschouwde situatie.

Zeespiegelstijging

Omdat zowel het dwarstransport als het langstransport gemodelleerd zijn, zal het stijgen van de waterspiegel automatisch leiden tot een, relatief ten opzichte van de waterstand, gewijzigd dwarsprofiel. Het dwarstransport zal uiteindelijk willen resulteren in een herstel van de initiële stabiele profielvorm. Om deze profielvorm op de plaats te houden (en dus geen kustachteruitgang te laten plaatsvinden) zal er in het model automatisch extra materiaal worden gesuppleerd. Dit laatste deel van het suppletievolume maakt daarmee dus expliciet onderdeel uit van de modellering.

Verfijnd rekenmodel in het interessegebied

De in het kader van de voorliggende beoordeling gebruikte kustlijnschematisatie heeft betrekking op de westkust van Zeeuwsch Vlaanderen. Hierbij is gebruik gemaakt van een relatief fijn rekengrid. Een dergelijke verfijning van de toepassing is ook toegepast voor de morfologische beoordeling van de basisvarianten voor de zwakke schakels in Noord-Holland [Alkyon, 2005a]. Op basis hiervan werd geconstateerd dat het model ook op een meer kleinere schaal zinvolle resultaten kan opleveren.

De ervaring met PONTOS is ruimer dan alleen Noord-Holland. Ook is het model o.a. toegepast voor het Hollandse Kust waarbij specifiek is gekeken naar de ontwikkeling bij de dammen bij IJmuiden. Ook hierbij bleek dat de ontwikkeling van de lokale kustlijn gesimuleerd (1970 → 1990 en 1990 → 2003).

De hierbij verkregen resultaten waren vergelijkbaar met de waargenomen ontwikkeling van de beide kustbogen. Het effect van havendammen lijkt derhalve voldoende betrouwbaar in het rekenmodel te zijn ingebouwd.

7.2.4 Gebruik van het model in de praktijk

Binnen het meerlijnenmodel wordt de grootte van het sedimenttransport als functie van een grote hoeveelheid combinaties van waterstands-, stroom- en golfcondities voor elke kustzone apart (duin, strand, vooroever, ...) gekwantificeerd en wordt bovendien rekening gehouden met de interne uitwisseling (het dwarstransport) tussen de verschillende zones.

Deze zones worden in het model gerepresenteerd door verschillende kustlijnen. De Y_r -lijn heeft hierbij bijvoorbeeld betrekking op de zogenaamde strandlaag welke de hoeveelheid zand tussen de NAP-2 m en de NAP+3 m representeert. De definitie van de modellen Y_0 t/m Y_n hangt samen met de definitie van het modelconcept. De BKL-laag valt hiermee dus per definitie niet mee samen. Bovendien schuift het BKL-venster met de gemiddelde waterstand mee omhoog. Het effect van het op verschillende wijzen uitvoeren van de onderhoudssuppleties is overigens uitgebreider onderzocht in een recent in kader van RWS/DGW uitgevoerde studie. Hieruit komt naar voren dat de positie van de kustlijn het beste kan worden onderhouden door het potentieel volumetekort aan te vullen in de Y_r -laag.

Naast de al eerder genoemde klimaatscenario's (zeespiegelstijging, mutaties in het golfklimaat) kunnen met het model ook de effecten van suppleties worden gesimuleerd. Verder is het mogelijk om, gegeven een bepaalde ligging van de basiskustlijn (de BKL), het op termijn benodigde kustonderhoud in plaats en tijd uit te rekenen.

Binnen de huidige toepassing wordt alleen het effect van een geleidelijke zeespiegelstijging in rekening gebracht (0,60 m per eeuw ofwel 0,30 m in 50 jaar).

Kwantificering kustlijnonderhoud

Het benodigde kustonderhoud wordt in versie 2.2 van het rekenmodel bepaald door de berekende ontwikkeling van de eerder genoemde MCL-laag te vergelijken met een te definiëren kritieke waarde. Op het moment dat deze kritieke waarde wordt overschreden wordt binnen het rekenmodel overgegaan tot een automatische aanvulling van de Y_r -laag. Het in plaats en tijd bijhouden van deze door het rekenmodel gegenereerde aanvullingen levert de gezochte kwantificering van het kustlijnonderhoud.

7.2.5 Betrouwbaarheid van de modelresultaten

Teneinde de betrouwbaarheid van de verkregen resultaten en met name de berekende onderhoudscijfers te vergroten zal overigens wel een vergelijking worden gemaakt met de omvang van het in het verleden uitgevoerde onderhoud. Hieruit volgt mogelijk nog een maat voor de mogelijke systematische fout in de berekende waarden.

Overigens moet met enige nadruk worden opgemerkt dat de hier gepresenteerde onderhoudscijfers primair bedoeld zijn voor *de onderlinge vergelijking* van de varianten. Hieruit zal dus blijken in hoeverre er sprake is van een significant verschil tussen het met de verschillende varianten samenhangende kustonderhoud.

Teneinde de effecten van de gehanteerde schematisatie in kaart te brengen zijn in aanvulling op de hier gepresenteerde resultaten ook berekeningen uitgevoerd met enigszins afwijkende schematisaties. Op basis van deze aanvullende resultaten werd geconcludeerd dat een afwijkende schematisatie in ieder geval niet leidt tot andere conclusies ten aanzien van de relatieve effecten van de verschillende varianten.

7.3 Modelopzet en aanpak

7.3.1 Opzet rekenmodel

In de figuren 7.1 tot en met 7.3 is een overzicht gegeven van het voor deze toepassing gehanteerde rekenmodel.

Figuur 7.1 geeft hierbij een overzicht van het gehanteerde modelsysteem. De X-as van het rekenmodel staat hierbij onder een hoek van $21,8^\circ$, overeenkomend met een tangens van 2/5. Deze volgt hierbij de globale kustlijn van West-Zeeuwsch-Vlaanderen. Het nulpunt van het assenstelsel valt hierbij samen met de X,Y-coördinaat (10.000, 376.000) ten opzichte van Parijs. In de figuur is de omvang van de in figuur 7.2 gepresenteerde uitsnede gegeven.

In deze figuur is naast een groot aantal laagposities ook de locatie van het relevante deel van het rekenmodel gegeven. De gepresenteerde Y-waarden hebben betrekking op de binnen het rekenmodel gebruikte rekenlagen. De Y_4 (zie figuur) heeft daarbij betrekking op de dieptezone tussen NAP-13 m en NAP-20 m en representeert daarbij globaal de 16 m dieptelijn. Meer relevant zijn de Y_0 , Y_1 en Y_2 -laag, welke grofstoffelijk gerelateerd zijn aan respectievelijk de positie van het duinfront (boven NAP +3 m), de waterlijn en de 5 m dieptelijn.

Uit de figuur blijkt overigens ook dat de positie van de diepere lagen (de Y_3 maar met name de Y_4 -laag) niet altijd te bepalen is. Deze ligt dan erg ver zeewaarts daarmee leidend tot een discontinuïteit in de laagposities.

In aanvulling op deze figuur is in figuur 7.3 het interessegebied gegeven met een topgrafische achtergrond.

7.3.2 Toekomstige ontwikkelingen: zeespiegelstijging

De uit te voeren berekeningen hebben betrekking op een tijdsperiode van 50 jaar. Hierbij is een zeespiegelstijging volgens het zogenaamde middenscenario in rekening gebracht. De gemiddelde waterstand neemt hierbij dus met 0,30 m toe.

7.3.3 Kustlijnonderhoud: handhaving/vaststelling van BKL

Er is momenteel een langjarig beleid met betrekking tot het onderhoud van de Nederlandse Kust. In 1990 is het principe voor de zogenaamde BasisKustLijn (BKL) vastgesteld. Dit is de positie van de kustlijn die minimaal door het Rijk gehandhaafd dient te worden. Met andere woorden: wanneer de Momentane KustLijn (MKL) landwaarts van de BKL ligt (of dreigt te komen), dient een onderhoudssuppletie te worden uitgevoerd. In de

Na implementatie van versterkingsmaatregelen (meer zand in het strandprofiel), zal de vooruitgeschoven kust ook onderhouden moeten worden. De huidige positie van de BKL ligt (ver) landwaarts ten opzichte van de vooruitgeschoven kust. Herdefiniëring van de BKL is daarbij dus noodzakelijk.

7.4 Definitie modelinvoer

7.4.1 Algemeen

In navolging op de algemene aanpak ten aanzien van de opzet van het model is in het volgende een nadere toelichting gegeven op de meer specifieke modelinvoer.

Daarbij komen achtereenvolgens aan de orde:

- De referentielijn;
- De laagposities;
- Het duinhoogte;
- De constructies;
- Het golf- en getijklimaat;
- De klimaatmutaties;
- Het kustonderhoud.

7.4.2 Referentielijn

In het model is gebruik gemaakt van de zogenaamde PONTOS-referentielijn (zie ook figuur 7.1). In tabel 7.1 is ter informatie, voor een aantal locaties, de relatie gegeven tussen de normale RSP-raaien en de locatie op het PONTOS-grid.

RSP-raai	Model-locatie [km]
4.13	15.226
4.96	14.464
6.02	13.368
7.05	12.337
7.91	11.495
9.03	10.309
9.85	9.614
10.46	9.036
11.62	7.876
12.82	6.672
13.63	5.861
14.12	5.398

Tabel 7.1: Relatie tussen RSP-raaien en locatie op het PONTOS-grid voor een aantal JARKUS-raaien.

7.4.3 Laagposities

De positie van de individuele laagposities is bepaald door voor elk van de relevante JARKUS-profielen de hoeveelheid materiaal tussen de laagbegrenzingsen uit te rekenen.

Op basis hiervan is de karakteristieke laagpositie binnen de JARKUS-raai bepaald. De hiertoe gebruikte (standaard) laagbegrenzingsen zijn gegeven in tabel 7.2.

Laag aanduiding	Niveau [m t.o.v. NAP]	Opmerkingen
Y0 - Duinlaag	$Z > 3$	Variaerend duinniveau
Y1 - Strandlaag	$-2 < Z < +3$	
Y2 - Brekerzone	$-7 < Z < -2$	
Y3 - Vooroever	$-13 < Z < -7$	
Y4 - Diepe vooroever	$-20 < Z < -13$	Hier niet relevant

Tabel 7.2: Overzicht gehanteerde modellagen.

Per JARKUS-profiel en laag levert dit dus een zekere positie op uit de RSP-lijn. Na omzetting naar een (X,Y) coördinaat is dit laatste resultaat vervolgens geconverteerd naar een positie in het gehanteerde PONTOS-referentiesysteem.

Deze bewerking is uitgevoerd voor een aantal opnamejaren, te weten:

- JARKUS-opname 1990 als maat voor de bodemligging van (begin) 1991;
- JARKUS-opname 2000 als maat voor de bodemligging van (begin) 2001;
- JARKUS-opname 2005 als maat voor de bodemligging van (begin) 2006.

Het resultaat van deze bewerkingen is gegeven in figuur 7.4a/c. De modelschematisatie volgt hierbij de op deze wijze afgeleide laagposities.

Duidelijk mag zijn dat de vaststelling van de diepste Y_4 laag problematisch is. In deze applicatie is deze laag dan ook buiten beschouwing gelaten. Dit is bereikt door deze enerzijds voldoende ver weg te leggen (gekozen is een vaste positie op 2.000 m uit de referentielijn) en bovendien de dwarsuitwisseling met deze laag 'uit te zetten'.

Als gevolg hiervan blijven de morfologische ontwikkelingen beperkt tot mutaties binnen de bovenste 4 modellagen.

7.4.4 Duinniveau

In het model wordt gewerkt met een aantal vaste laagbegrenzingsen (zie tabel 7.2).

Alleen de bovenbegrenzing van de duinlaag is afhankelijk van de lokale positie.

De gehanteerde, geschematiseerde langsverdeling van dit niveau is gegeven in figuur 7.5.

7.4.5 Constructies: strekdammen en dijken

Op het betreffende traject bevinden zich een grote hoeveelheid strekdammen, dit zowel in de vorm van paalrijen als echte dichte strekdammen.

Ten aanzien van de paalrijen is in het model alleen het effect van de lager gelegen fundatie (kopbestorting) meegenomen. De paalrijen zelf hebben immers slechts een zeer beperkte invloed op de morfologie; de positie en niveau van de verdedigde koppen des te meer.

Voor een aantal andere dammen (waaronder de dammen bij de uitwateringssluys) is wel gewerkt met een relatief hoog niveau van de constructie.

De positie van de (kop van de) dammen is bepaald aan de hand van de topografische kaart met de in figuur 7.6 gegeven schematisatie als resultaat. Voor het niveau van de strekdammen met de paalrijen is in het model gebruik gemaakt van een niveau van NAP+1 m. Voor de andere dichte dammen is een niveau van NAP+3 m aangehouden. In

het laatste geval is er altijd sprake van een volledige blokkade van het langtransport. In het eerste geval is dit slechts het geval bij de lagere waterstanden.

7.4.6 Golf- en getijklimaat

Gezien de beperkte omvang van het beschouwde gebied mag worden verwacht dat de gradiënten in het langtransport (welke leiden tot de aanwezige aanzandings- en erosiepatronen), voornamelijk worden bepaald door de lokale kustlijnoriëntatie en de effecten van de aanwezige constructies.

Mede daarom is ook gekozen voor een zo goed mogelijke algemene karakterisering van het hydraulische klimaat ter plaatse van het midden van het beschouwde traject. Hierbij is, conform de opzet van het rekenmodel, onderscheid gemaakt tussen het golfklimaat en het getijklimaat.

Golfklimaat

Voor het karakteriseren van het golfklimaat is gebruik gemaakt van een via het SWAN-model geproduceerde vertaling van de bij offshore meetstations beschikbare golfinformatie. Uiteindelijk levert dit een tabel waarin voor een groot aantal golfhoogteklassen de kans van voorkomen per windrichting is gegeven. Deze tabel is vervolgens voor de relevante golfrichtingen omgezet naar een modelinvoer.

Het resultaat (met 49 verschillende condities) laat zien dat er een zeer grote spreiding in de golfrichtingen aanwezig is; zowel golfaanval uit westelijke als oostelijke richtingen. Voor de modelapplicatie is dit klimaat vertaald naar een wat simpeler klimaat met gelijkwaardige eigenschappen, dat wil zeggen eenzelfde zogenaamde S-phi-kromme. Een dergelijke S-phi-curve geeft de relatie tussen het golfgedreven langtransport en de hoek van golfinval.

Het rekenklimaat (bestaande uit 13 verschillende condities) is daarbij dus zodanig gekozen dat zowel de doorsnijding van de S-phi-curve met de nul-as (de evenwichtsoriëntatie van de kustlijn) als de helling van de S-phi-curve (de mutatie in het transport bij een verandering van de kustoriëntatie) overeenkwamen met dat van het meer uitgebreide golfklimaat.

Zowel de helling van deze curve (een maat voor de grootte van de golfaanval) als de evenwichtshoek zijn overigens in de calibratiefase gebruikt voor het afregelen van het rekenmodel.

Horizontaal en verticaal getij

Voor de karakterisering van het getijklimaat is gebruik gemaakt van een uit een andere studie afkomstig modelresultaat. Meer specifiek gaat het daarbij om een (op een bepaalde waterdiepte; in dit geval 11,5 m) gecombineerd verloop van de (verticale) waterstand en de (horizontale) langsstroomsnelheid. Dit signaal is vervolgens omgezet naar een 12-tal combinaties van waterstand en langsstroom.

De waterstand varieert hierbij tussen NAP-1,89 m en NAP+1,92 m (een getijslag van orde 4 m). De stroomsnelheid van -0,78 m/s westwaarts tot +0,93 m/s oostwaarts (netto drift 0,02 m/s oostwaarts).

Combinatie van het golfklimaat en het getijklimaat leidt tot 13 maal 12 is 156 verschillende condities.

7.4.7 Klimaatmutaties

Zoals reeds eerder vermeld is het voor het effect van de zeespiegelstijging een geleidelijke toename van de gemiddelde waterstand van 0,30 m in 50 jaar in rekening gebracht.

7.4.8 Kustonderhoud

Bij de afregeling van het rekenmodel is ook rekening gehouden met het in de periode 1991 t/m 2005 uitgevoerde kustonderhoud. Hiertoe zijn de in het kustvak uitgevoerde suppleties als invoer in het model opgenomen. Hierbij is verondersteld dat de suppletie steeds in het tweede kwartaal van het jaar zijn uitgevoerd.

Uiteindelijk levert dit voor de beschouwde intervallen (1991 → 2001 en 2001 → 2006) een langsverdeling op van de suppletieinspanning. Figuur 7.7 geeft deze grafisch weer. In de gesuppleerde kustvakken bedraagt het gemiddelde onderhoud in de huidige situatie blijkbaar tussen de 30 en 50 m³/m¹/jaar.

De toekomstige onderhoudsbehoefte is vastgesteld door het definiëren van een kritieke rekenwaarde van de momentane kustlijnpositie (vergelijkbaar met de BKL). Bij het overschrijden van deze positie wordt er in het model overgegaan tot het uitvoeren van een aanvulling.

7.5 De afregeling van het model

7.5.1 Algemeen

Bij het afregelen van het rekenmodel voor de huidige applicatie zijn twee opeenvolgende stappen onderscheiden, te weten een afregeling op de grootte van het dwars-transport en een afregeling op de grootte van het langstransport.

7.5.2 Dwarstransport

Uit de eerdere analyses kwam reeds naar voren dat het kustprofiel in de centrale secties van de kustvakken als dynamisch stabiel kon worden aangemerkt. Dit gegeven is dan ook gebruikt om het dwarstransportproces zodanig af te regelen dat deze situatie ook in het model wordt weergegeven.

Hiertoe is gebruik gemaakt van een speciale afregelprocedure die er op neer komt dat voor de initiële berekeningen (de 1991, 2001 en 2006-situatie) het bij het golfklimaat behorende evenwichtsprofiel wordt uitgerekend. Feitelijk volgt hierbij dus uit het rekenmodel een stabiele eindsituatie waarbij de afstand tussen de verschillende modellagen zodanig is dat er netto geen dwarstransport aanwezig is.

Deze per individuele laag berekende afstand is vervolgens vergeleken met de daadwerkelijk aanwezige verschilafstand. Op basis van deze vergelijking is een maat voor de correctie van de berekende afstand vastgesteld.

Bij toepassing van deze correctie, of feitelijk calibratie, zijn deze dwarsprofielen dus ook in het rekenmodel in evenwicht.

In figuur 7.8 is een en ander geïllustreerd aan de hand van het dwarstransport door de NAP-2m contour. Van belang is hierbij de afstand tussen de Y₂- en de Y₁-laag. De middelste figuur geeft hiervan een overzicht. Hierin is ook de veronderstelde evenwichtsafstand aangegeven (160 tot 185 m). Afregeling op deze evenwichtsafstand leidt tot de in de onderste figuur aangegeven dwarstransporten. Ter plaatse van de flauwere dwarsprofielen (o.a. ter plaatse van de Verdrongen Zwarte Polder) is er nu

sprake van een netto landwaarts transport. Netto zeewaarts transport wordt gevonden ter plaatse van de kustsecties met relatief steile dwarsprofielen. Op een soortgelijke wijze zijn ook de dwarstransporten op de andere niveaus afgeregeld.

7.5.3 Langtransport en kustonderhoud

Gegeven de gepresenteerde afregeling van het dwarstransport is vervolgens het langtransport nader geanalyseerd. Vergelijkbaar met de uitwerking voor het dwarstransport is ook hier gekeken naar het effect op de morfologische ontwikkeling.

Als maat voor deze ontwikkeling is hierbij gebruik gemaakt van de zogenaamde MKL-positie. Deze is, voor een gegeven omvang van de BKL-laag (hier gedefinieerd tussen NAP-6,8 m en NAP+3,0 m) en de eerder vastgestelde laagposities, berekend voor zowel de 1991-, de 2001- als de 2006-situatie.

Uit deze waarden is ook de mutatie in de MKL-positie af te leiden. Deze (feitelijk gemeten) mutatie is vervolgens vergeleken met de berekende mutatie zoals deze volgt uit een toepassing van het rekenmodel voor de perioden 1991 → 2001, 2001 → 2006 alsmede 1991 → 2006.

Voor de afregeling is hierbij gekeken naar de instelling voor de volgende parameters:

- De grootte van het golfgedreven langtransport (relatieve calibratiefactor op het transport);
- De evenwichtshoek (absolute correctie op de hoek van golfval);
- Het niveau en de effectiviteit van de strekdammen (paalrijen).

Uit de uitgevoerde simulaties kwam naar voren dat de MKL-ontwikkeling in grote mate wordt beïnvloed door het uitgevoerde kustonderhoud.

De uiteindelijke kwaliteit van de afregeling is dan ook primair bepaald door het modelresultaat voor wat betreft het berekende onderhoud te vergelijken met het daadwerkelijk uitgevoerde kustonderhoud.

Hiertoe is voor de 2006-situatie het toekomstige onderhoud voor de referentie situatie vergeleken met het gemiddeld uitgevoerde onderhoud.

Het resultaat hiervan is gegeven in figuur 7.9. Voor deze figuur is overigens gebruik gemaakt van vakgemiddelde waarden. De hierbij gehanteerde vakbegrenzungen zijn ook in de figuur aangegeven.

Uit de figuur blijkt dat het berekende kustonderhoud in dezelfde orde van grootte is als het tot op heden uitgevoerde onderhoud. Ook de ruimtelijke verdeling van de onderhoudsinspanning wordt goed door het model gepresenteerd. Mede op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de voorliggende afregeling van het model een goed uitgangspunt vormt voor het doorrekenen van de consequenties van verschillende ingrepen.

7.6 Voorspellingen

In deze morfologische studie is het relatieve effect van de verschillende basisvarianten in kaart gebracht door het berekende benodigde kustonderhoud voor deze varianten te vergelijken met de grootte van het onderhoud voor de referentie-situatie.



Centraal staan daarbij de per variant te gebruiken schematisatie (als onderscheidende invoer) en de grootte van het berekende kustonderhoud (als onderscheidende uitvoer). Deze uitwerking komt in de volgende paragraaf uitgebreider aan de orde.

In figuur 7.10 is tenslotte ter illustratie nog een screendump gegeven van het gehanteerde rekenmodel. Hierin is het effect van de aanwezige constructies duidelijk herkenbaar.

8 Resultaten morfologisch model en analyses

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de relevante resultaten van de uitgevoerde berekeningen gepresenteerd. Deze berekeningen hebben betrekking op het gebiedsdeel van de oostelijke begrenzing van het Zwin (rond km raai 15) tot iets oostelijk van Nieuwesluis (km raai 4). In het totaal betreft dit een gemodelleerde kuststrook van 10,75 km.

Voor de andere interessegebieden (zoals Breskens-Oost en Breskens-Veste) is geen morfologisch model opgetuigd. Conclusies ten aanzien van morfologische ontwikkelingen zijn in deze laatste gevallen gebaseerd op de aanvullende beschouwingen en 'expert-judgement'. Deze komen in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk aan de orde.

Ten aanzien van de resultaten van het in het vorige hoofdstuk beschreven morfologische model zijn in het volgende twee verschillende soorten berekeningen onderscheiden, te weten:

- Berekeningen gericht op de verschillen tussen de MER-alternatieven;
- Berekeningen ten behoeve van de voorkeursvariant (versterkingsplan).

In de eerste serie gaat het om de resultaten van de vergelijkende berekeningen gericht op het inzichtelijk maken van de verschillen tussen de onderscheiden zeewaartse hoofdvarianten. Deze informatie is met name van belang voor de selectie van het voorkeursalternatief.

In de tweede serie is, met een meer in detail afgeregelde versie van het rekenmodel, een serie detailberekeningen uitgevoerd gericht op de nadere detaillering van het voorkeursalternatief.

8.2 Beschouwde varianten t.b.v. MER-studie

8.2.1 Referentiesituatie

Voor de referentiesituatie is uitgegaan van de huidige bodemligging. In modeltermen betreft dit dus de positie van de dieptelijnen welke gebaseerd is op de JARKUS-informatie uit 2005. Deze situatie wordt aangeduid als "huidige situatie 2006".

Figuur 8.1 geeft deze uitgangssituatie weer. De bovenste afbeelding geeft hierbij een overzicht met een topografische kaart als ondergrond. De onderste figuur geeft de positie van de modellen Y_0 tot en met Y_3 . Ook de positie van de in rekening gebrachte constructies is hierbij aangegeven.

Verder is in deze figuur de begrenzing van de gehanteerde balansvakken weergegeven. In het totaal worden op het beschouwde gebied acht balansvakken onderscheiden. Deze balansvakken zijn met name bedoeld om de gedetailleerde resultaten van het rekenmodel te vertalen naar tijds- en vak-geïntegreerde grootheden. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan de grootte van de tijdsgemiddelde onderhoudsbehoefte uitgedrukt in m^3 /jaar per vak en per tijdsfase (bijvoorbeeld tussen 0 en 5 jaar na aanleg).