

Zeespiegelstijging en de gevolgen voor de Nederlandse Kust

A.F. Wolters

Eindrapport, December 1995

Technische Universiteit Delft

Technische

Adviscommissie voor de

Waterkeringen



Voorwoord

Dit rapport is opgesteld in het kader van het onderzoek van de Technische Advies Commissie voor de Waterkeringen (TAW-C) naar de gevolgen van een eventuele zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust. In de eerste fase van deze studie is uitgezocht wat er bekend is over het onderwerp. Tevens is in die fase nagegaan wat, naar verwachting, de gevolgen zullen zijn voor de Nederlandse zandige kust (strand/duinen). Aan de hand hiervan is een werkplan opgesteld voor de tweede fase van deze studie. In deze tweede fase zijn enkele van die gevolgen nader onderzocht. De resultaten van dit onderzoek zijn in dit rapport samengevat. Als werkorgaan van de Technische Advies Commissie heeft de dienst Weg- en Waterbouwkunde samen met de Technische Universiteit Delft voor de financiering van dit onderzoek zorg gedragen.

Namens de TAW-C is het onderzoek begeleid door de begeleidingscommissie zeespiegelstijging die bestaat uit:

- Dr. ir. J. van de Graaff
- Ir. A.W. Kraak
- Ir. H.D. Rakhorst
- Ir. J.T.M van der Sande
- Ir. H.J. Verhagen

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1 Inleiding	7
2 Klimaatveranderingen en de gevolgen voor de Nederlandse kust	9
2.1 Broeikaseffect	9
2.2 De gevolgen van het broeikaseffect	9
2.2.1 Absolute zeespiegelstijging	9
2.2.2 Verandering van het klimaat	11
2.2.3 Verandering van de overheersende golfrichting	11
2.2.4 Verandering van de ontwerpparameters	11
2.2.5 Verhoging rivierafvoer	13
2.3 Gevolgen voor de Nederlandse kust	13
2.3.1 De Nederlandse kust	13
2.3.2 Ophoging strandprofiel	15
2.3.3 Verandering van zandtransport	19
2.3.4 Toename zandvraag van kombergingsgebieden	19
2.3.5 Toename duinafslag	21
3 Dynamisch handhaven in de toekomst	23
3.1 Doel van dit onderzoek	23
3.1.1 Algemene doelstelling	23
3.1.2 Onderzoeksvragen	23
3.2 Aanpak van het onderzoek	25
3.2.1 Bepaling hoeveelheden zand die nodig zijn om de zeespiegelstijging te volgen	25
3.2.2 Beschouwing van de plaats waar de suppleties uitgevoerd worden	25
3.2.3 Controle van de veiligheid van de duinen	25
3.2.4 Analyse van het langstransport langs de Nederlandse kust	26
3.2.5 Beschouwing van de processen in de Waddenzee en langs de Zeeuwse kust	27
3.2.6 Beschouwing van de bepaalde hoeveelheden suppletiemateriaal	27
3.2.7 Aanpassingen definitie Basiskustlijn	27
4 Bepaling hoeveelheden zand om zeespiegelstijging te volgen	29
4.1 Inleiding	29
4.2 Algemene berekeningswijze	29

4.3	Resultaten	31
4.4	Samenvatting van de resultaten	37
5	De uitvoering van de suppleties	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Vooroeversuppleties	39
5.2.1	De effectiviteit van vooroeversuppleties	39
5.2.2	Langstransport	39
5.2.3	Conclusies	41
5.3	Strandsuppleties	41
5.3.1	Uitgestelde aanleg	41
5.4	De beschikbaarheid van de benodigde hoeveelheden zand	42
6	De veiligheid van de duinen als waterkering	43
6.1	Inleiding	43
6.2	De huidige toestand van de Nederlandse kust	43
6.3	Toetsing van de veiligheid bij alleen zeespiegelstijging	43
6.3.1	De Hollandse kust	43
6.3.2	De Zeeuwse kust	45
6.3.3	De Waddenkust	45
6.4	Toetsing van de veiligheid bij optreden van de verschillende scenario's	53
6.4.1	De Hollandse kust	53
6.4.2	De Zeeuwse kust	53
6.4.3	De Waddenkust	59
6.5	Toetsing van de veiligheid bij uitgestelde aanleg	59
6.5.1	De Hollandse kust	61
6.5.2	De Zeeuwse kust	65
6.5.3	De Wadden kust	65
6.6	Discussie over de toename van duinafslag	65
6.6.1	De achtergrond van de aangenomen scenario's	67
7	Langstransporten langs de Hollandse kust	71
7.1	Inleiding	71
7.2	Gevoeligheidsanalyse	71

7.3	Toepassingen voor de voorspelde scenario's	75
7.3.1	Langtransport in kustvak Camperduin	75
7.3.2	Langtransport in het kustvak Rijnland	79
7.3.3	Langtransport in het kustvak Delfland	79
7.3.4	Totaaloverzicht van de toename van het langtransport	79
8	Het Waddengebied en de Zeeuwse kust	81
8.1	Inleiding	81
8.2	De Waddenzee	81
8.3	De Zeeuwse kust	84
8.3.1	De Oosterschelde	84
8.3.2	De Westerschelde	84
9	Uitvoering van het handhavingsbeleid	85
9.1	Inleiding	85
9.2	Hoeveelheden zand benodigd voor de uitvoering van het handhavingsbeleid	85
9.2.1	Ophoging dwarsprofielen volgens Bruun-benadering	85
9.2.2	Suppleties ter compensatie van erosie door verandering langtransportgradiënten	87
9.2.3	De situatie in Zeeland en in het Waddengebied	89
9.2.4	De totale hoeveelheden benodigd om handhavingsbeleid uit te voeren	89
9.3	De veiligheid van de duinen als waterkering	91
9.4	Aanpassingen definities van de grenzen van rekenschijf ten behoeve van de bepaling van Basiskustlijn en Momentane kustlijn	93
10	Conclusies en aanbevelingen	95
10.1	Conclusies	95
10.2	Aanbevelingen	96
11	Literatuurlijst	99
	Bijlage I Analyse zandsuppleties	103
	Bijlage II Golfgegevens Boei bij IJmuiden	107
	Bijlage III Coëfficiënten zoals gebruikt in UNIBEST	117

Figurenlijst

fig 2.1	De verschillende scenario's van zeespiegelstijging	10
fig 2.2	Stormvloedstanden bij Hoek van Holland	10
fig 2.3	Zeespiegelstijging leidt tot kustachteruitgang	14
fig 2.4	Profielaanpassing bij zeespiegelstijging	14
fig 2.5	Verdeling kustzones in oppervlaktes	16
fig 2.6	Ophoging profiel ter voorkoming van kustachteruitgang	16
fig 2.7	Kustgericht dwarstransport door zoet water	20
fig 2.8	Duinafslag als functie van stormvloedstanden en golfhoogtes	20
fig 3.1	Hoeveelheden zand bij suppleren tot gegeven dieptelijn	24
fig 3.2	Toestand bij uitgestelde aanleg	24
fig 3.3	Gevoeligheidsanalyse van langstransport	26
fig 4.1	Ophoging profiel van duintop tot dieptelijn	30
fig 4.2	Definitie-schets	30
fig 4.3	Oppervlak per raai	30
fig 4.4	Hoeveelheden benodigd suppletiemateriaal per meter breedte per kustvak	32
fig 4.5	Hoeveelheden benodigd suppletiemateriaal per meter breedte per kustvak	33
fig 4.6	Totaal benodigde hoeveelheid zand per jaar voor de totale kust	37
fig 5.1	Effectiviteit van suppletie bij bepaalde aanlegdiepte ("Kustbeleid na 1990"; TR 14)	40
fig 5.2	Uitgestelde aanleg	40
fig 6.1	Dwarsprofiel Rijnland	44
fig 6.2	Duinafslag volgens DUROS voor kustvak Rijnland	44
fig 6.3	Toename in duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Rijnland	46
fig 6.4	Toename van duinafslag t.o.v. de zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland	46
fig 6.5	Resultaten DUROS voor zeespiegelstijging	47
fig 6.6	Dwarsprofiel Schouwen-Duiveland	48
fig 6.7	Duinafslag volgens DUROS voor Schouwen-Duiveland	48
fig 6.8	Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Schouwen	49
fig 6.9	Toename duinafslag t.o.v. zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen	49
fig 6.10	Dwarsprofiel Terschelling	50
fig 6.11	Duinafslag volgens DUROS voor kustvak Terschelling	50
fig 6.12	Procentuele toename duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Terschelling	51
fig 6.13	Toename duinafslag t.o.v. zeespiegelstijging voor kustvak Terschelling	51
fig 6.14	Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Rijnland	54
fig 6.15	Berekening met verlengd profiel kustvak Rijnland	55
fig 6.16	Toename duinafslag in 2090 en 2190 kustvak Rijnland	55
fig 6.17	Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor Schouwen-Duiveland	56

fig 6.18	Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor Terschelling	57
fig 6.19	Voorbeeld van invoer voor de waterstand in DUROSTA	58
fig 6.20	Voorbeeld van invoer voor golfhoogte en -periode in DUROSTA	58
fig 6.21	Golfhoogte bij uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland	62
fig 6.22	Golfhoogte bij uitgestelde aanleg volgens scenario 3 voor kustvak Rijnland	62
fig 6.23	Golfhoogte als functie van windsnelheid en diepte	66
fig 6.24	Toename golfhoogte bij toename windsnelheid en diepte	66
fig 7.1	Toename langtransport bij toename golfhoogte	72
fig 7.2	Toename langtransport bij toename golfperiode	72
fig 7.3	Verandering langtransport bij toename hoek van inval	73
fig 7.4	Verandering langtransport bij toename korreldiameter	73
fig 7.5	Toename langtransport Camperduin volgens scenario's	74
fig 7.6	Toename langtransport t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg .	74
fig 7.7	Toename langtransport Rijnland volgens scenario's	76
fig 7.8	Toename langtransport Rijnland t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg	76
fig 7.9	Toename langtransport Hoek van Holland t.g.v. scenario's	77
fig 7.10	Toename langtransport t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg .	77
fig 9.1	Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij beleidscenario	86
fig 9.2	Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij anticiperend scenario	86
fig 9.3	Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij ongunstig scenario	86
fig 9.4	Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het beleidsscenario	90
fig 9.5	Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het anticiperende scenario	90
fig 9.6	Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het ongunstige scenario	90
fig 9.7	Ophoging profiel van duintop tot dieptelijn	92
fig 9.8	Berekening van de momentane ligging van de kustlijn	92
fig I.1	Verschillende suppletietypes	104
fig II.1	Golfrichtingen en kustoriëntatie	107

Tabellenlijst

Tabel 0.1	Ontwerpparameters 2090 t.o.v. 1990 ("Kustbeleid na 1990")	2
Tabel 0.2	Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens beleidsscenario	2
Tabel 0.3	Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens anticiperende scenario	3
Tabel 0.4	Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens ongunstige scenario	3
Tabel 0.5	Hoeveelheden volgens beleidsscenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht	3
Tabel 0.6	Hoeveelheden volgens anticiperende scenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht	4
Tabel 0.7	Hoeveelheden volgens ongunstige scenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht	4
Tabel 0.8	Procentuele toename duinafslag volgens de verschillende scenario's . .	4
Tabel 0.9	Procentuele toename duinafslag bij alleen zeespiegelstijging	4
Tabel 2.1	Ontwerpparameters 2090 t.o.v. 1990 ("Kustverdediging na 1990")	12
Tabel 2.2	Zandbalans Nederlandse kust (waarden per jaar) ("Kustverdediging na 1990")	12
Tabel 4.1	Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 1	34
Tabel 4.2	Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 2	35
Tabel 4.3	Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 3	36
Tabel 5.1	Effectiviteit na vijf jaar ("Kustbeleid na 1990"; TR 14)	40
Tabel 6.1	Ontwerpparameters voor kustvak Rijnland	44
Tabel 6.2	Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland	46
Tabel 6.3	Ontwerpparameters voor Schouwen-Duiveland	48
Tabel 6.4	Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen	49
Tabel 6.5	Ontwerpparameters Terschelling	50
Tabel 6.6	Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging in kustvak Terschelling	51
Tabel 6.7	De verschillende scenario's volgens de nota 'Kustverdediging na 1990' onder extreme omstandigheden.	52
Tabel 6.8	Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Rijnland	52
Tabel 6.9	Duinafslaganalyse t.o.v. het geval met alleen zeespiegelstijging (1,70m) in 2190	55
Tabel 6.10	Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Schouwen- Duiveland	56
Tabel 6.11	Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Terschelling	57
Tabel 6.12	Toename erosie t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland	60

Tabel 6.13	Toename erosie t.g.v. uitgestelde aanleg volgens verschillende scenario's voor kustvak Rijnland	60
Tabel 6.14	Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen	63
Tabel 6.15	Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij verschillende scenario's voor kustvak Schouwen	63
Tabel 6.16	Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Terschelling	64
Tabel 6.17	Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij de verschillende scenario's voor kustvak Terschelling	64
Tabel 6.18	Toename duinafslag in Rijnland bij toename parameters	68
Tabel 6.19	Toename duinafslag in Schouwen bij toename parameters	68
Tabel 6.20	Toename duinafslag in Terschelling bij toename parameters	69
Tabel 7.1	Resultaten Camperduin	78
Tabel 7.2	Resultaten Rijnland	78
Tabel 7.3	Resultaten Hoek van Holland	78
Tabel 8.1	Zandvraag Waddenzee	82
Tabel 8.2	Totale zandvraag Waddenzee bij de verschillende scenario's	82
Tabel 9.1	Hoeveelheden jaarlijks te suppleren ter voorkoming kustlijnachteruitgang	86
Tabel 9.2	Totale zandvraag Waddenzee bij de verschillende scenario's	88
Tabel 9.3	Toename duinafslag in procenten t.o.v. duinafslag onder huidige stormomstandigheden	88
Tabel 9.4	Toename duinafslag in procenten t.o.v. duinafslag onder huidige omstandigheden bij alleen zeespiegelstijging	88
Tabel I.1	Kosten per hoeveelheid suppletiemateriaal	105
Tabel II.1	Invoerwaarden voor de golfgegevens	115
Tabel III.1	Coëfficiënten voor transportvergelijkingen	117
Tabel III.2	Coëfficiënten voor golven en stroming	117

Samenvatting

De temperatuur op aarde stijgt. Een gevolg van deze temperatuurstijging is zeespiegelstijging. Een ander gevolg zou kunnen zijn dat de weersomstandigheden kunnen veranderen. De gemiddelde windkracht zou kunnen toenemen waardoor de golfhoogtes kunnen toenemen. Ook de gemiddelde windrichting zou kunnen veranderen. Eén en ander zal gevolgen hebben voor de Nederlandse kust.

Door zeespiegelstijging gaat de kustlijn achteruit. In 1990 is besloten dat de positie van de kustlijn zal worden gehandhaafd op de plaats waar deze begin 1990 lag. Het handhaven van de kustlijn zal gebeuren door op plaatsen waar de verplaatsing van de kustlijn een landwaartse trend vertoont zandsuppleties uit te voeren.

Wanneer veranderingen op gaan treden in de gemiddelde golfhoogte en -richting zal dat gevolgen hebben voor de zandtransporten langs de Nederlandse kust, zowel in dwars- als in langsrichting. De duinafslag tijdens stormomstandigheden kan dus gaan toenemen. Verder kunnen de gradiënten in het langtransport gaan veranderen waardoor de erosie- (en aanzandings) hoeveelheden veranderen.

In een onderbouwende studie voor het kustbeleid ("kustbeleid na 1990") zijn een drietal scenario's opgesteld met betrekking tot zeespiegelstijging en andere ontwerpparameters. Deze zijn weergegeven in tabel 0.1. Het beleidsscenario is het scenario waar momenteel vanuit wordt gegaan bij de uitvoering van het kustbeleid. Het anticiperende scenario gaat uit van de te verwachten veranderingen. Als bovengrens is er nog een ongunstig scenario aangegeven. Deze tabel heeft als uitgangspunt voor deze studie gefungeerd.

Het doel van deze studie was te bepalen of het handhavingsbeleid in de toekomst kan worden voortgezet. Daarvoor is bepaald hoeveel zand er in de toekomst nodig zal zijn voor de handhaving van de positie van de kustlijn. Daarnaast is nagegaan of de veiligheid van de duinen als waterkering in de toekomst in het geding kan komen.

Het is gebleken dat de hoeveelheden zand die nodig zijn om de kust conform de zeespiegelstijging op te hogen binnen de perken blijven als het probleem alleen met de zogenaamde Bruun-benadering wordt beschouwd.

Verder kunnen veranderingen op gaan treden in de langtransportgradiënten. Die veranderingen kunnen leiden tot een toename van de erosie langs de kust. Deze erosie zal gecompenseerd moeten worden met extra suppleties. De hoeveelheden die hiervoor nodig zijn, zijn ook niet erg groot.

Uit andere studies is echter gebleken dat de hoeveelheden zand die in de toekomst nodig zullen zijn om het ecologische systeem van de Waddenzee te behouden veel groter zullen zijn dan de hoeveelheden die uit de Bruun-benadering voor de verschillende kustsecties volgen. De Waddenzee blijkt dus in hoge mate bepalend te zijn voor de totale hoeveelheid jaarlijks te suppleren zand.

Parameters	Scenario		
	Beleids	Anticiperend	Ongunstig
Gemiddelde Zeespiegel (m)	+0,20	+0,60	+0,85
Windkracht (%)	0	0	+10
Windrichting (graden)	0	0	+10
Gemiddelde Hoogwaterniveau (m)	+0,20	+0,65	+0,90
Gemiddelde Laagwaterniveau (m)	+0,20	+0,55	+0,80
Basispeil (m)	+0,20	+0,65	+1,50
Significante golfhoogte op 20m lijn onder gemiddelde omstandigheden (%)	0	0	+10
Significante ontwerpgolfhoogte op 20m lijn onder extreme omstandigheden (%)	0	0	+8
Golfperiode bij ontwerpgolf onder extreme omstandigheden (s)	0	0	+1
Golfrichting (graden) (verdraaiing in ongunstige zin)	0	0	+10

Tabel 0.1 Ontwerpparameters 2090 t.o.v. 1990 ("Kustbeleid na 1990")

Scenario 1	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	26,7	310,8	21,8	235,4	21,8	235,4
8	27,0	315,4	22,0	238,5	22,0	238,5
12	27,2	318,5	22,2	241,5	22,2	241,5
20	28,5	338,5	23,5	261,5	23,5	261,5

Tabel 0.2 Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens beleidsscenario

Scenario 2	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	27,1	316,9	28,8	343,1	28,9	344,6
8	27,9	329,2	29,4	352,3	29,4	352,3
12	28,6	340,0	30,1	363,1	30,1	363,1
20	32,6	401,5	34,1	424,6	34,1	424,6

Tabel 0.3 Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens anticiperende scenario

Scenario 3	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	27,4	321,5	33,1	409,2	34,5	430,8
8	28,5	338,5	34,0	423,1	35,0	438,5
12	29,5	353,9	35,0	438,5	35,9	452,3
20	35,1	440,0	40,6	524,6	41,6	540,0

Tabel 0.4 Totale hoeveelheden zand benodigd voor uitvoering handhavingsbeleid volgens ongunstige scenario

Scenario 1	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	6,7	3,1	6,8	4,6	6,8	4,6
8	7,0	7,7	7,0	7,7	7,0	7,7
12	7,2	10,8	7,2	10,8	7,2	10,8
20	8,5	30,8	8,5	30,8	8,5	30,8

Tabel 0.5 Hoeveelheden volgens beleidsscenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht

Scenario 2	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	7,1	9,2	7,3	12,3	7,4	13,9
8	7,9	21,5	7,9	21,5	7,9	21,5
12	8,6	32,3	8,6	32,3	8,6	32,3
20	12,6	93,9	12,6	93,9	12,6	93,9

Tabel 0.6 Hoeveelheden volgens anticiperende scenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht

Scenario 3	1990		2090		2190	
Dieptelijn (m-NAP)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)	Hoeveelheid (10 ⁶ m ³)	Toename (%)
3	7,4	13,9	8,6	32,3	10,0	53,9
8	8,5	30,8	9,5	46,2	10,5	61,5
12	9,5	46,2	10,5	61,5	11,4	75,4
20	15,1	132,3	16,1	147,7	17,1	163,1

Tabel 0.7 Hoeveelheden volgens ongunstige scenario wanneer zandvraag Waddenzee niet in rekening wordt gebracht

Jaar	2090		2190	
Ophoging kustprofiel	Volledig	Uitgesteld	Volledig	Uitgesteld
Beleidsscenario	2,8	4,0	6,1	9,0
Anticiperend scenario	12,6	15,9	34,3	41,5
Ongunstig scenario	58,2	63,1	136,1	142,2

Tabel 0.8 Procentuele toename duinafslag volgens de verschillende scenario's

Jaar	2090		2190	
Ophoging kustprofiel	Volledig	Uitgesteld	Volledig	Uitgesteld
Beleidsscenario	2,8	4,0	6,1	9,0
Anticiperend scenario	9,7	12,7	24,0	30,0
Ongunstig scenario	15,1	20,8	40,1	47,3

Tabel 0.9 Procentuele toename duinafslag bij alleen zeespiegelstijging

De totale hoeveelheid zand die jaarlijks gesuppleerd moet worden is afhankelijk van het aan te houden scenario en de dieptelijn tot waar het kustprofiel wordt opgehoogd. De totale hoeveelheden benodigd voor de uitvoering van het handhavingsbeleid zijn voor enkele dieptelijnen en per scenario voor de jaren 1990, 2090 en 2190 weergegeven in de tabellen 0.2, 0.3 en 0.4.

Als referentiewaarde voor de bepaling van de toename van de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand is de $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ genomen die sinds de invoering van het handhavingsbeleid (1990) jaarlijks wordt gesuppleerd. Een toename van 300% houdt bijvoorbeeld in dat er jaarlijks $6,5 \cdot 10^6 + 3 \cdot 6,5 \cdot 10^6 = 26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gesuppleerd moet worden.

De toenames van de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand lijken erg groot. In dit verband kan echter worden gewezen op plannen om de Maasvlakte en andere kustgedeelten uit te breiden. Voor de beoogde uitbreiding van de Maasvlakte is naar schatting $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand nodig en voor de andere kustuitbreidingen ongeveer $1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Ten opzichte van deze getallen die welliswaar éénmalig zijn valt een jaarlijks benodigde hoeveelheid van $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand wel mee. Op grond hiervan zou gesteld kunnen worden dat het handhavingsbeleid ook in de toekomst kan worden voortgezet.

Het verdient aanbeveling nader onderzoek naar de toepassing van het handhavingsbeleid voor de Waddeneilanden te doen. Wanneer de zandvraag van de Waddenzee niet wordt meegenomen bij de berekening van de totale hoeveelheden dan worden namelijk de hoeveelheden verkregen zoals gegeven in de tabellen 0.5, 0.6 en 0.7.

Naast het handhaven van de positie van de kustlijn is het van belang dat de veiligheid van de duinen ook in de toekomst gehandhaafd blijft. Het is niet zeker of bij het handhaven van de positie van de kustlijn op de manier zoals hierboven beschreven ook de veiligheid gewaarborgd blijft. Vooral wanneer het klimaat zodanig verandert dat de stormomstandigheden verslechteren, is dit de vraag.

Volgens de verschillende scenario's die uitgewerkt zijn, zal in de toekomst de duinafslag tijdens stormomstandigheden toenemen. Ook de toename van de duinafslag is afhankelijk van het aan te houden scenario en van het al dan niet uitstellen van de ophoging van de vooroever. Wanneer gerekend wordt volgens de scenario's dan worden voor de duinafslag tijdens stormomstandigheden de toenamingspercentages gevonden zoals weergegeven in tabel 0.8. Wanneer alleen zeespiegelstijging in de beschouwing wordt betrokken dan zijn de toenemingspercentages lager, zoals te zien is in tabel 0.9. Om de veiligheid van de duinen als waterkering te blijven garanderen zal per kustvak moeten worden nagegaan wat de consequenties zullen zijn van de vastgestelde scenario's. Mede afhankelijk van het te hanteren scenario zal blijken of er in een bepaald kustvak in de toekomst maatregelen nodig zijn. Hierbij is het zaak dat er voldoende ruimte wordt gereserveerd voor de duinen zodat die eventuele maatregelen (bijvoorbeeld landwaartse verbreding) ook kunnen worden uitgevoerd.

1 Inleiding

Naar verwachting zal door het toenemende broeikaseffect de temperatuur op aarde stijgen. Eén van de gevolgen van een dergelijke temperatuurstijging is zeespiegelstijging. Een ander effect zou kunnen zijn dat de weersomstandigheden gaan veranderen, zodat het, naar verwachting, vaker en heviger zal gaan stormen. Dat dit gevolgen zal hebben voor kustzones over de gehele wereld is duidelijk. Daar komt nog bij dat de wereldbevolking nog steeds groeit. Omdat kustzones vaak economische centra zijn, vindt deze bevolkingsgroei in belangrijke mate in deze kustgebieden plaats. Ook hierdoor worden de kustgebieden bedreigd. Over deze problemen is in 1993 "The World Coast Conference" gehouden, waarbij vertegenwoordigers van landen over de hele wereld met een bedreigde kust ervaringen konden uitwisselen.

Het doel van deze studie is te onderzoeken of het in 1990 vastgestelde kustbeleid in de toekomst kan worden voortgezet. In dat kustbeleid is vastgesteld dat de Nederlandse kustlijn in beginsel tenminste zal worden gehandhaafd op de plaats waar deze begin 1990 lag. Tevens is vastgesteld dat dit zal gebeuren door op plaatsen waar het nodig is zandsuppleties uit te voeren. Sinds 1990 wordt er jaarlijks ongeveer $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand gesuppleerd. Door klimaatveranderingen kan deze hoeveelheid toenemen. In deze studie is nagegaan of deze hoeveelheid in de toekomst niet te groot zal worden; met andere woorden of het economisch haalbaar blijft om de kustlijn "dynamisch te handhaven". Daarnaast is nagegaan wat de consequenties zijn van de eventuele klimaatveranderingen voor de veiligheid van de duinen als waterkering.

In deze rapportage worden eerst de verschillende processen, en de gevolgen hiervan voor de Nederlandse kust, beschreven die op kunnen gaan treden door klimaatveranderingen. Dit is gebeurd in de eerste fase van deze studie. De bevindingen van deze voorstudie zijn al eerder beschreven in een werkplan. Dit werkplan is samengevat in de hoofdstukken 2 en 3. In hoofdstuk 3 is tevens aangegeven wat er in de tweede fase van de studie onderzocht is en op welke wijze dat is gedaan. De hoofdstukken daarna behandelen de resultaten van de tweede fase van deze studie. Deze studie beperkt zich tot de zone die direct aan zee grenst.

2 Klimaatveranderingen en de gevolgen voor de Nederlandse kust

2.1 Broeikaseffect

Wanneer er gesproken wordt over het broeikaseffect, gaat het in feite over de toename van het broeikaseffect. Bij het broeikaseffect gaat het erom dat de stralingswarmte van de aarde wordt vastgehouden door de atmosfeer. Zonder dit proces zou leven op aarde niet mogelijk zijn. Wat de laatste tijd echter is te zien, is dat door de toename van de uitstoot van sporegassen, waarvan koolstofdioxide de belangrijkste is, het broeikaseffect toeneemt. Hierdoor stijgt de temperatuur op aarde. Vanaf 1900 is de temperatuur een halve graad gestegen. De verwachting is dat bij een verdubbeling van het koolstofdioxide-gehalte de gemiddelde temperatuur ongeveer 3 graden zal stijgen. Dit kan echter ook 1,5 of 4,5 graden zijn. Bij de huidige ontwikkeling zal een verdubbeling van het koolstofdioxide-gehalte van 1990 rond het jaar 2030 worden bereikt. Dit betekent niet dat de temperatuur dan al drie graden gestegen is. Doordat de oceanen een belangrijk deel van de warmte opnemen, wordt de opwarming van de atmosfeer enkele tientallen jaren vertraagd.

2.2 De gevolgen van het broeikaseffect

2.2.1 Absolute zeespiegelstijging

Als de temperatuur op aarde stijgt kan de zeespiegel stijgen door de volgende oorzaken:

- * *Afsmelting van de gletsjers*; bij een hogere temperatuur smelten de gletsjers verder af en trekken zich terug. Hierdoor voeren de rivieren meer water af en komt er dus meer water in de zee terecht.
- * *Afsmelting van Antartica*; bij Antartica spelen twee tegengestelde processen ten gevolge van de temperatuurstijging. Ten eerste smelt er ijs af van Antartica. Ten tweede neemt echter de neerslag ter plaatse toe. Door de hogere temperatuur verdampt er meer water. Dit water slaat, in de vorm van sneeuw, gedeeltelijk weer neer op Antartica. Hierdoor neemt de ijsmassa op Antartica juist toe. Welk van de twee processen overheersend zal worden, is nog niet geheel bekend. Verwacht wordt dat de toename zal overheersen.
- * *Thermische expansie*; ook de temperatuur van het zeewater zal toenemen. Hierdoor zet het uit, en stijgt de zeespiegel.

N.B. Het ijs rond de Noordpool zal ook smelten. Omdat dit ijs echter op het water drijft, stijgt de zeespiegel hier niet door!

Naast de bovengenoemde oorzaken voor absolute zeespiegelstijging speelt ook de daling van het maaiveld in Nederland een rol. Relatief gezien neemt hierdoor de zeespiegelstijging toe. Er is dan sprake van relatieve zeespiegelstijging. In het vervolg van dit rapport wordt met zeespiegelstijging steeds de relatieve zeespiegelstijging bedoeld. In de afgelopen eeuw is een zeespiegelstijging van circa 0,20 m gemeten. Voor de volgende eeuw wordt uitgegaan van drie scenario's voor zeespiegelstijging:

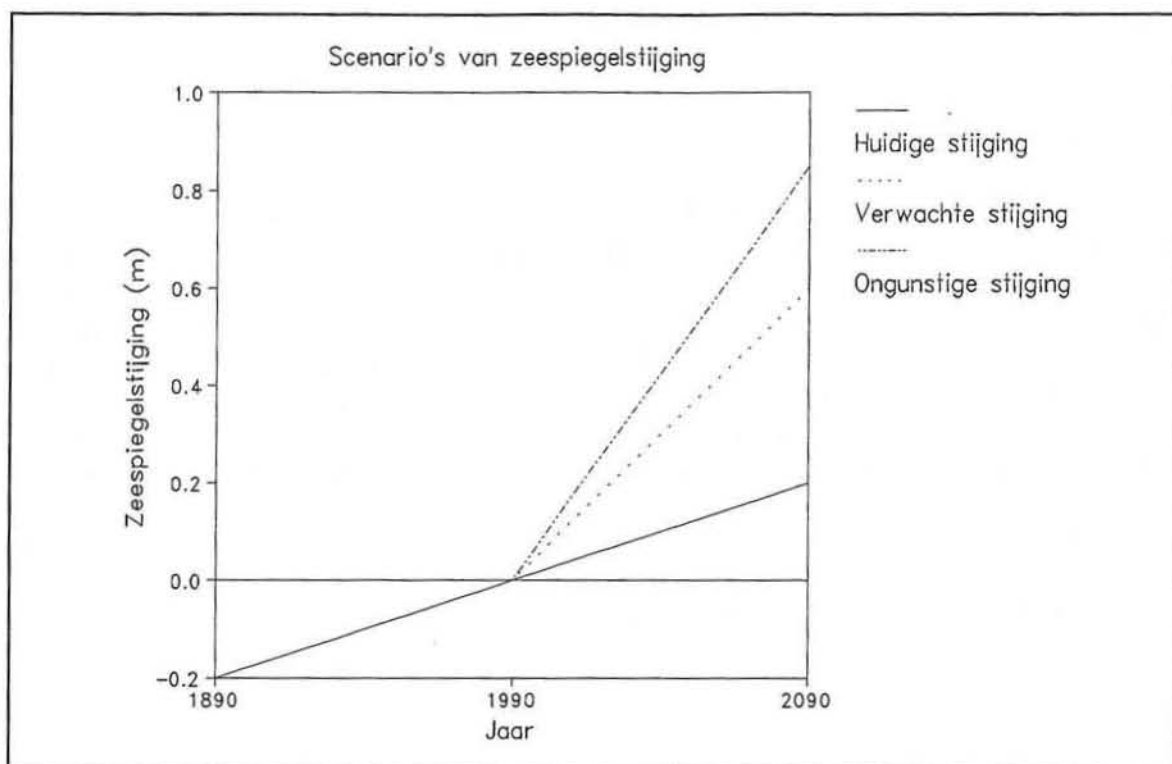


fig 2.1 De verschillende scenario's van zeespiegelstijging

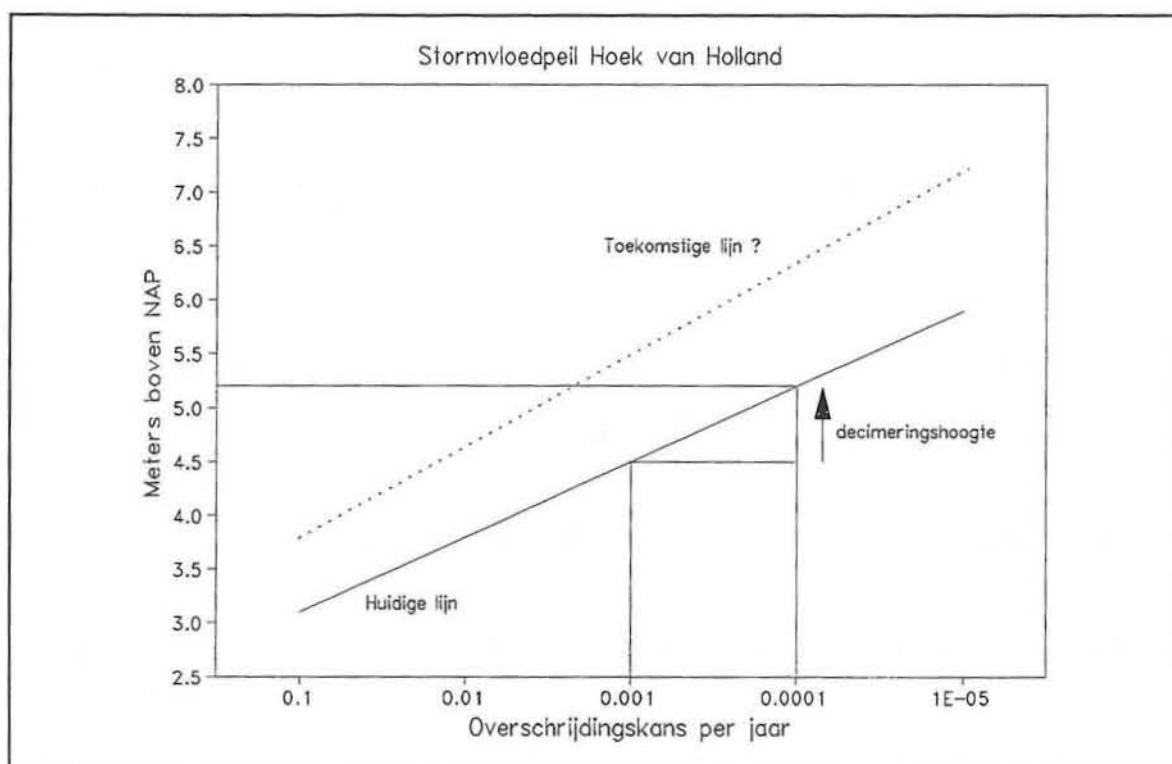


fig 2.2 Stormvloedstanden bij Hoek van Holland

- 1 *Huidige stijging*: hierbij wordt uitgegaan van een voortzetting van de stijging in de afgelopen eeuw (0,20 m/eeuw).
- 2 *Verwachte stijging*: hierbij wordt uitgegaan van de verwachte zeespiegelstijging voor de volgende eeuw (0,60 m/eeuw).
- 3 *Ongunstige stijging*: hierbij wordt uitgegaan van een extra stijging ten opzichte van de verwachte waarde (totaal 0,85 m/eeuw).

Deze scenario's worden in figuur 2.1 afgebeeld. In dit rapport wordt uitgegaan van de waarden zoals gegeven in de nota 'Kustverdediging na 1990'. In het IPCC-rapport (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1994) worden iets andere waarden gebruikt waarin nieuwe inzichten m.b.t. het broeikaseffect zijn verwerkt. Omdat zeespiegelstijging een gevolg is van het broeikaseffect, is de zeespiegelstijging mede afhankelijk van de koolstofdioxide-concentratie in de atmosfeer. Het is dus zaak de uitstoot van koolstofdioxide te verminderen. Als het zou lukken de koolstofdioxide-concentratie te stabiliseren, dan nog blijft de zeespiegel stijgen omdat het lang duurt voordat het systeem weer in evenwicht is.

2.2.2 Verandering van het klimaat

Door een toename van de temperatuur zou het klimaat kunnen veranderen. Hoe dat zou veranderen, kan niet met zekerheid worden gezegd. Als het klimaat dusdanig zou veranderen dat het harder gaat waaien dan heeft dat invloed op de kust. De golfhoogten nemen toe. Overigens nemen ook de extreme golfhoogten toe door de verdieping van de Noordzee als gevolg van de zeespiegelstijging. Dit heeft gevolgen voor de langstransporten langs de kust en voor de mate van duinafslag tijdens een storm. Een ander aspect is dat het ook vaker kan gaan stormen dan nu het geval is. Momenteel wordt bij de dimensionering van waterkeringen langs de kust uitgegaan van een stormvloedpeil met een overschrijdingskans van 1/10000 per jaar. Als stormen vaker voorkomen neemt de overschrijdingskans van het huidige ontwerppeil toe. Om de huidige veiligheid te handhaven moet dus worden uitgegaan van hogere stormvloedstanden. Het één en ander is verduidelijkt in figuur 2.2. In deze figuur worden de stormvloedstanden in Hoek van Holland weergegeven. In de toekomst kan deze lijn anders gaan liggen. Hierdoor kan ook de decimeringshoogte veranderen. De decimeringshoogte is een maat voor de verandering van het stormvloedpeil bij een verandering van de overschrijdingskans met een factor 10. Momenteel bedraagt deze decimeringshoogte ongeveer 0,75 m.

2.2.3 Verandering van de overheersende golfrichting

Door klimaatveranderingen kan de wind ook uit andere richtingen gaan waaien. Een gevolg hiervan is dat de hoek van inval van de golven op de kust zal veranderen. Dit zal dan weer gevolgen kunnen hebben voor de zandhuishouding van de Nederlandse kust.

2.2.4 Verandering van de ontwerpparameters

Uit de paragrafen 2.2.1 en 2.2.2 blijkt dat de te hanteren ontwerpparameters in de toekomst kunnen gaan veranderen als gevolg van eventuele klimaatveranderingen. In de serie onderbouwende technische rapporten van de nota "Kustverdediging na 1990" is in Technisch Rapport 6 een tabel opgenomen voor de toe te passen ontwerpparameters in 2090. Deze tabel is weergegeven als tabel 2.1. In deze tabel wordt uitgegaan van drie scenario's. Deze scenario's zijn:

Parameters	Scenario		
	Beleids	Anticiperend	Ongunstig
Gemiddelde Zeespiegel (m)	+0,20	+0,60	+0,85
Windkracht (%)	0	0	+10
Windrichting (graden)	0	0	+10
Gemiddelde Hoogwaterniveau (m)	+0,20	+0,65	+0,90
Gemiddelde Laagwaterniveau (m)	+0,20	+0,55	+0,80
Basispeil (m)	+0,20	+0,65	+1,50
Significante golfhoogte op 20m lijn onder gemiddelde omstandigheden (%)	0	0	+10
Significante ontwerp golfhoogte op 20m lijn onder extreme omstandigheden (%)	0	0	+8
Golfperiode bij ontwerp golf onder extreme omstandigheden (s)	0	0	+1
Golfrichting (graden) (verdraaiing in ongunstige zin)	0	0	+10

Tabel 2.1 Ontwerpparameters 2090 t.o.v. 1990 ("Kustverdediging na 1990")

	Sedimentatie 10^6 m^3	Erosie 10^6 m^3	Netto 10^6 m^3	Suppleties 10^6 m^3
Deltagebied	2,2	0,6	1,6	0,8
Hollandse kust	1,1	2,2	-1,1	0,2
Waddengebied	1,1	2,1	-1,0	0,6
Totaal	4,4	4,9	-0,5	1,6

Tabel 2.2 Zandbalans Nederlandse kust (waarden per jaar) ("Kustverdediging na 1990")

1. *Beleidsscenario*: hierin wordt uitgegaan van de huidige trend, dat wil zeggen een zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw en geen verandering van windkracht en windrichting. Momenteel wordt bij het handhavingsbeleid van dit scenario uitgegaan.
2. *Anticiperend scenario*: hiervoor zijn de beste schattingen van de te verwachten veranderingen in de zeepiegel gekozen (0,60 m voor 2090).
3. *Ongunstig scenario*: hierbij wordt uitgegaan van een extra zeespiegelstijging (0,85 m voor 2090) en een verandering van windkracht en windrichting.

Voor berekeningen in de tweede fase van deze studie zijn de waarden uit tabel 2.1 gebruikt. Voor het jaar 2190 zijn de waarden uit de tabel geëxtrapoleerd. Dit komt volgens het ongunstige scenario neer op een verhoging van het basispeil met 3 m en een verhoging van de golfperiode met 2 s ten opzichte van de huidige situatie. De golfhoogte wordt ten opzichte 2090 nog eens met 8 % (of 10 %) verhoogd. Het valt zeer te betwijfelen of deze verhogingen ook echt zullen optreden. Deze waarden kunnen dan ook als een bovengrens worden gezien. In deze studie zijn de genoemde waarden echter als uitgangspunt genomen.

2.2.5 Verhoging rivierafvoer

Door temperatuurveranderingen treden er ook veranderingen in de verdamping en neerslag op. Dit kan leiden tot hogere rivierafvoeren. Dit zal consequenties hebben voor de veiligheid van de rivierdijken en de waterhuishouding in de verschillende Nederlandse polders. Omdat er in deze studie gekeken wordt naar de gevolgen voor de kust, zal op bovenstaande punten niet verder worden ingegaan. Wat wel van belang kan zijn voor de kust is het hogere debiet dat naar zee wordt afgevoerd. Hier wordt in paragraaf 2.3.3 verder op ingegaan.

2.3 Gevolgen voor de Nederlandse kust

2.3.1 De Nederlandse kust

De Nederlandse kust is op te delen in drie morfologische gebieden namelijk: de Zeeuwse delta, de Hollandse kust en het Waddengebied. Het grote verschil tussen de Hollandse kust enerzijds en de Zeeuwse delta en het Waddengebied anderzijds is dat het eerste gebied, morfologisch gezien, door golven gedomineerd wordt en de andere twee vooral door getijstromen.

Jaarlijks worden metingen verricht om de ligging van de Nederlandse kust vast te stellen. Deze gegevens worden opgeslagen in het zogenaamde Jarkus bestand. Door deze gegevens over een reeks van jaren te analyseren, kan vastgesteld worden of de kust aangroeit, erodeert of stabiel is. Het is gebleken dat er kustdelen zijn die aangroeien maar dat er ook delen zijn die eroderen. Om welke mate van erosie en aanzanding het gaat, is aangegeven in tabel 2.2. Tabel 2.2. is overgenomen uit de kustnota 1990 en geldt voor de periode vóór 1990. In het basisrapport bij de kustnota 1995 (De Ruig, 1995) zijn vergelijkbare erosie en sedimentatie waarden genoemd.

De regering heeft besloten dat de gemiddelde kustlijn niet landwaarts van de kustlijn van 1990 mag komen te liggen. Vanaf 1990 wordt kustlijnachteruitgang dus niet meer getolereerd. Met behulp van de jaarlijkse metingen wordt nagegaan waar de komende jaren problemen zijn te verwachten. Op plaatsen waar de kust de tendens vertoont zich terug te trekken tot achter de

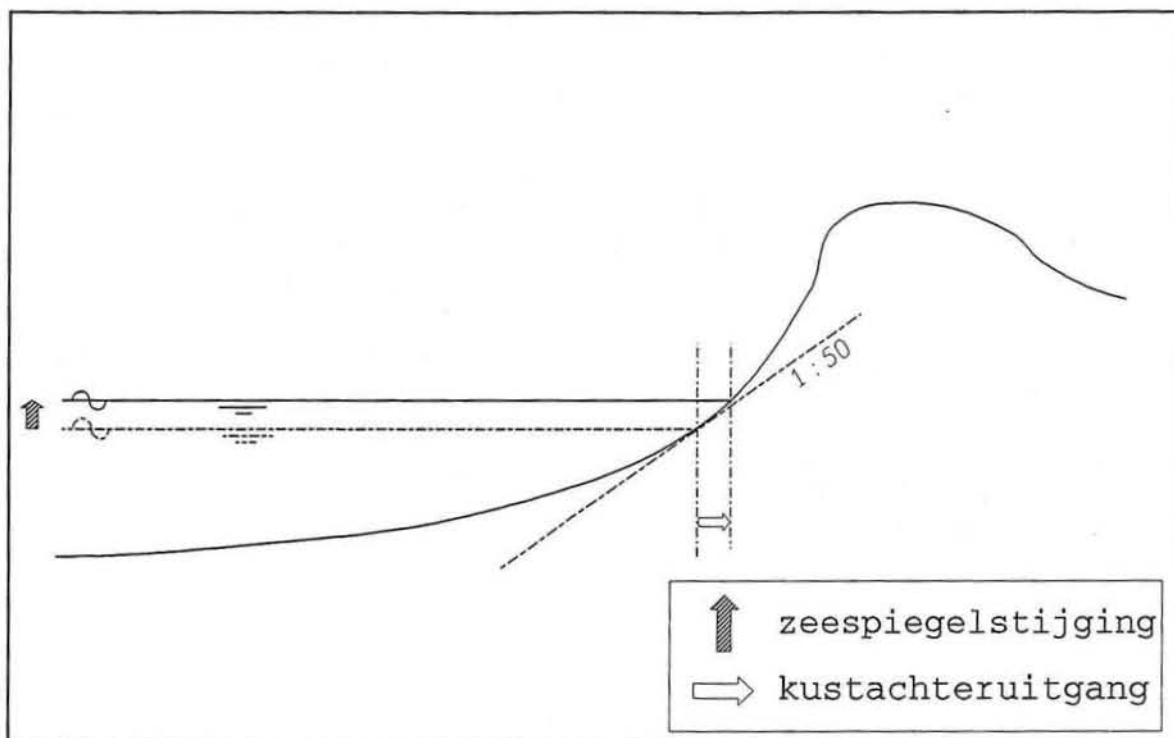


fig 2.3 Zeespiegelstijging leidt tot kustachteruitgang

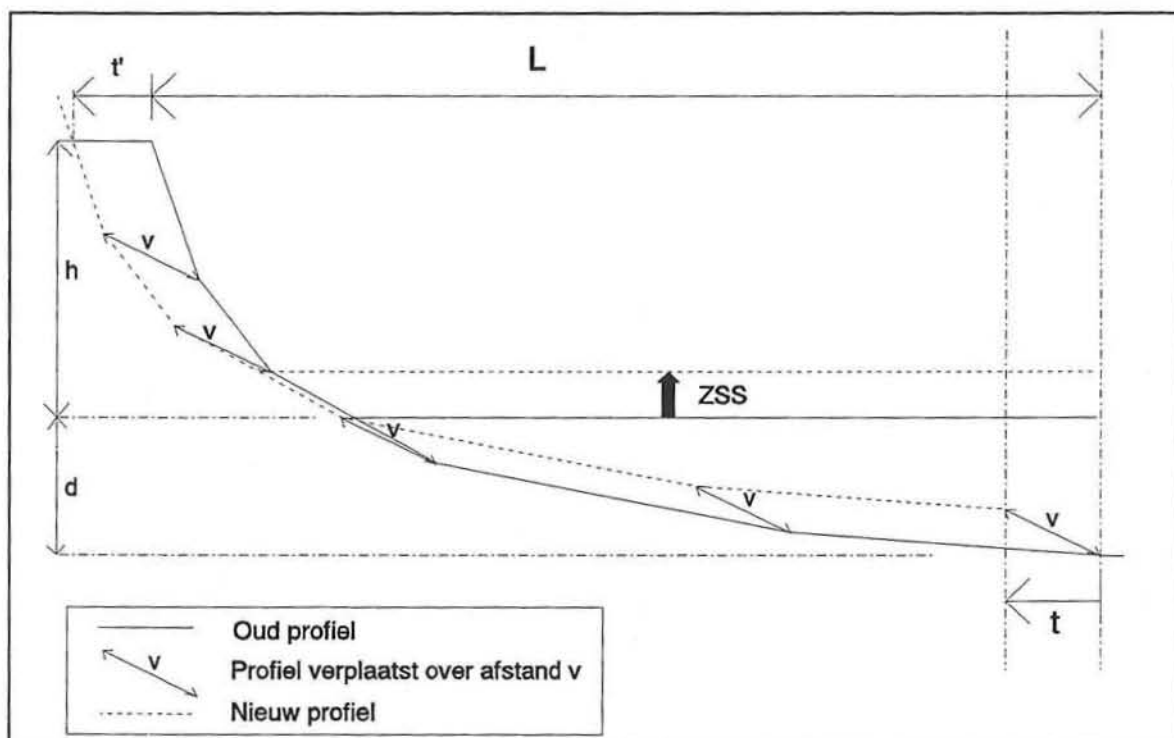


fig 2.4 Profielaanpassing bij zeespiegelstijging

kustlijn van 1990 worden zandsuppleties uitgevoerd. In tabel 2.2 zijn enkele totaal cijfers gegeven van de zandbalans zoals die gold vóór 1990 voor de gehele Nederlandse kust.

Om de eroderende kustvakken in evenwicht te houden is circa $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ($4,9+1,6$) zand nodig. Sedimentatie wordt hierbij niet in rekening gebracht. Het is de bedoeling in de toekomst de kust door middel van zandsuppleties op zijn plaats te houden. Om de kustligging te handhaven wordt sinds 1990 dan ook jaarlijks ongeveer $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand gesuppleerd. Als gevolg van de zeespiegelstijging zullen de benodigde hoeveelheden toenemen. In deze studie zal een orde van grootte van deze hoeveelheden worden geschat. Verder dient te worden nagegaan of suppleties op plaatsen waar diepe getijgeulen voorkomen wel zinvol zijn. In deze geulen kan immers veel van het gesuppleerde zand verloren gaan. Op sommige van deze plaatsen, zoals bijvoorbeeld op Texel, kan het verstandiger zijn de erosie met harde kunstwerken te bestrijden.

Zeker op de lange termijn zal de temperatuurstijging gevolgen hebben voor de Nederlandse kust. Bij een versnelde zeespiegelstijging moeten dijken opgehoogd worden. Door eventuele klimaatveranderingen kunnen ook verhogingen noodzakelijk zijn in verband met zwaardere golfaanvallen en hogere golfoploop. Ook voor de zandige kust, die in deze studie wordt beschouwd, geldt dat er gevolgen zullen zijn die maatregelen noodzakelijk maken. Die gevolgen zullen in de volgende paragrafen worden besproken.

2.3.2 Opfoming strandprofiel

Zeespiegelstijging leidt tot kustachteruitgang

In figuur 2.3 is aangegeven hoe een zeespiegelstijging tot gevolg heeft dat de kust achteruitgaat. Uitgaande van een zeespiegelstijging van 1 m en een gemiddelde strandhelling van 1 op 50, bedraagt deze achteruitgang 50 m. Hier blijft het niet bij. Wanneer er sprake is van een zeespiegelstijging dan zal ook de vorm van het profiel zich aanpassen.

Profielaanpassing leidt tot kustachteruitgang

Het bovenste deel van een dwarsprofiel bij een zandige kust kan vaak worden opgevat als een dynamische evenwichtsvorm. Gedurende een reeks van jaren vertoont een dergelijk profiel ten opzichte van de gemiddelde waterstand een min of meer constante vorm (Bruun, 1954). De vorm van dat profiel wordt bij een zware stormvloed verstoord. In de periode na de storm wordt de oorspronkelijke profielvorm weer bereikt. Om bij zeespiegelstijging de vorm van het bovenste deel van het dwarsprofiel (evenwichtsvorm) te handhaven zullen profielaanpassingen optreden. Bij een overigens sluitende zandbalans in dwarsrichting wordt zand van het bovenste deel van het dwarsprofiel (duinen en strand) naar dieper water getransporteerd om aldaar de bodem op te hogen. Hierdoor ontstaat kustachteruitgang. De mate van kustachteruitgang is te bepalen door een zandbalans op te stellen. Hiervoor moet eerst een zeewaartse grens aan het dwarsprofiel worden gesteld. Er kan bijvoorbeeld worden gesteld dat het actieve kustprofiel zich uitstrekt tot de NAP -8 m lijn. De afstand van de oorspronkelijke duintop tot het punt waar de waterdiepte 8 m is, wordt L genoemd. Het gedeelte van het dwarsprofiel dat zeewaarts van dit punt ligt wordt dus niet meegerekend. Vervolgens wordt het oude profiel over een afstand v verschoven. Dit is in figuur 2.4 aangegeven. De verticale component van v is de zeespiegelstijging, de horizontale component is de kustachteruitgang. Om de mate van kustachteruitgang te kwantificeren kan het dwarsprofiel in verschillende oppervlaktes worden verdeeld. Dit is in figuur 2.5 aangegeven.

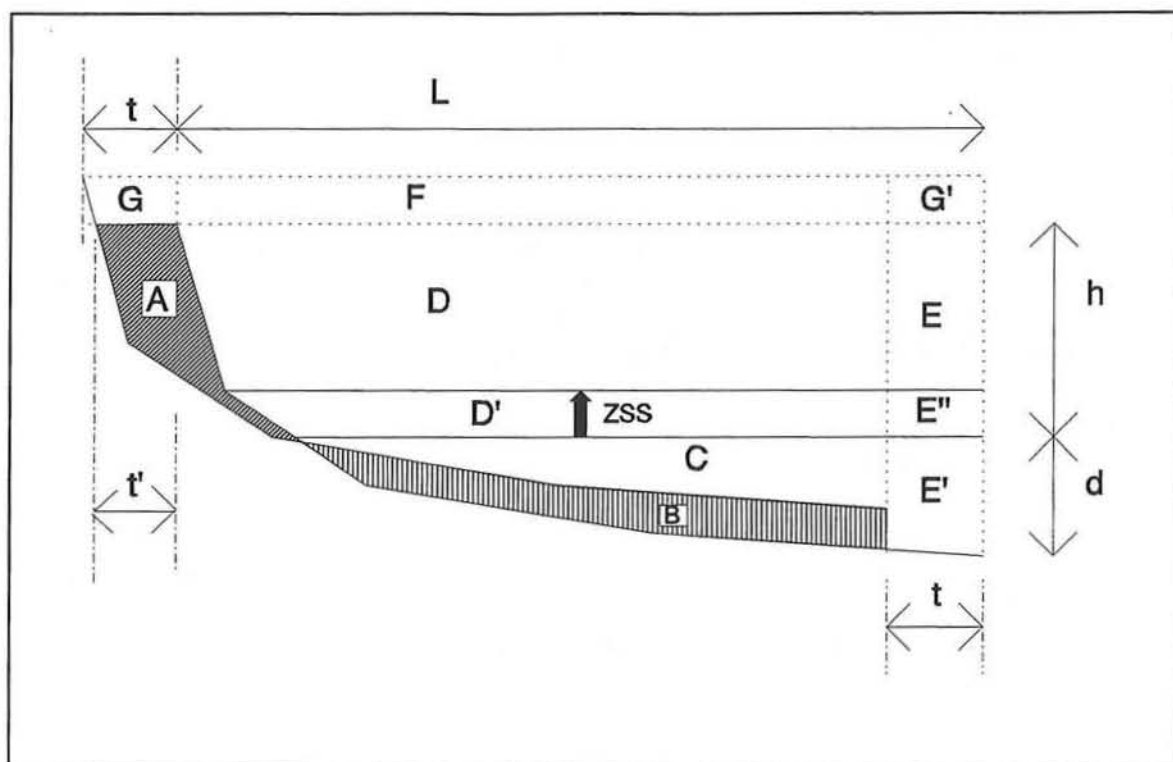


fig 2.5 Verdeling kustzones in oppervlaktes

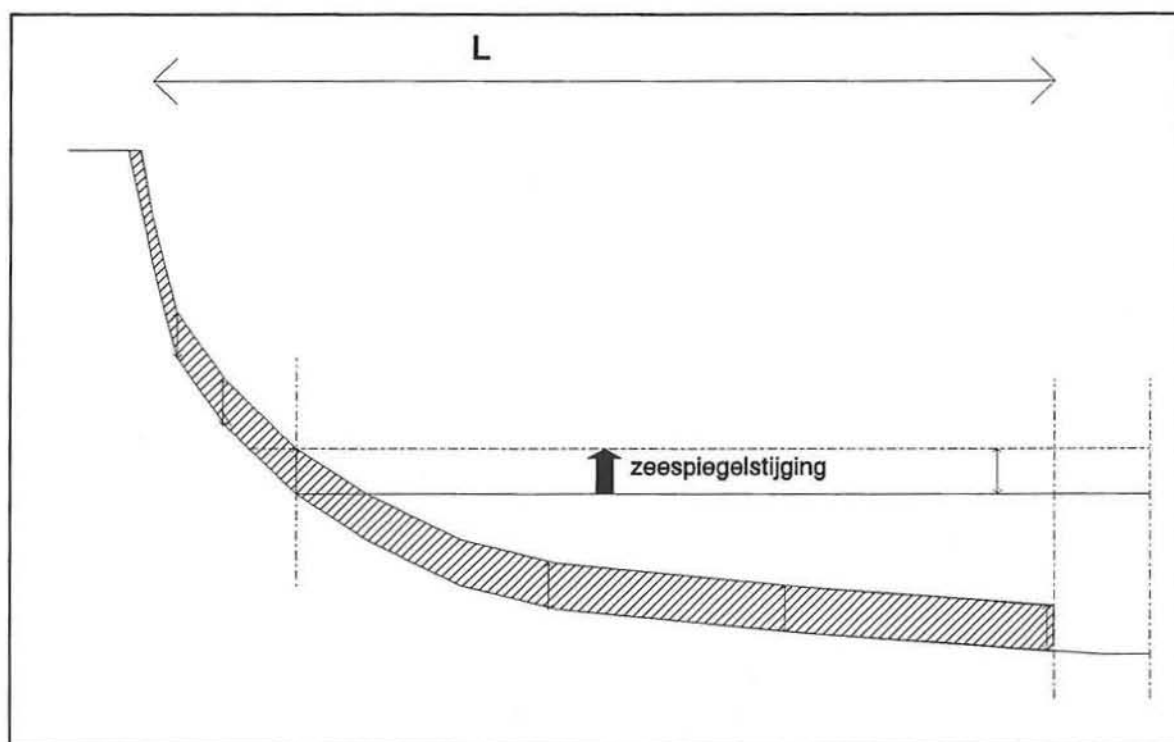


fig 2.6 Ophoging profiel ter voorkoming van kustachteruitgang

Als de vorm van het profiel ten opzichte van de gemiddelde waterstand in de nieuwe situatie precies dezelfde is als in de oude situatie dan geldt:

$$D+D'+C+B+E+E'+E''=G+F+A+D+D'+C \quad (1)$$

Oftewel:

$$B+E+E'+E''=G+F+A \quad (2)$$

Verder geldt (sluitende zandbalans in dwarsrichting):

$$A=B \quad (3)$$

Vergelijking (3) invullen in (2) levert:

$$B+E+E'+E''=G+F+B \Rightarrow E+E'+E''=G+F \quad (4)$$

Er geldt:

$$E+E'+E''=(h+d)t \quad (5)$$

Dus vergelijking (4) wordt:

$$(h+d)t=G+F \quad (6)$$

Voor het oppervlak G' geldt:

$$G'=ZSS*t \quad (7)$$

En voor het oppervlak G geldt:

$$G=ZSS*t'+\frac{(t-t')ZSS}{2} \quad (8)$$

Voor t' geldt:

$$t'=t-ZSS*a \quad (9)$$

Dus geldt voor t :

$$t=t'+ZSS*a \quad (10)$$

Vergelijking (9) in (8) ingevuld levert na enig omschrijven:

$$G=ZSS*t-ZSS^2*\frac{a}{2} \quad (11)$$

Invullen van G' voor ZSS^*t (verg. (7)) in (11) geeft nu:

$$G = G' - ZSS^2 * \frac{a}{2} \quad (12)$$

En dit weer ingevuld in (6) geeft:

$$(h+d)t = G' + F - ZSS^2 * \frac{a}{2} \quad (13)$$

Er geldt:

$$G' + F = ZSS * L \quad (14)$$

Invullen van (14) in (13) geeft:

$$(h+d)t = ZSS(L - \frac{a}{2} * ZSS) \quad (15)$$

Aldus wordt voor t gevonden:

$$t = \frac{ZSS(L - \frac{a}{2} * ZSS)}{(h+d)} \quad (16)$$

Dit kan omgeschreven worden naar de achteruitgang van de duintop t' (verg. (10) invullen voor t):

$$t' = \frac{ZSS(L - a(h+d) - \frac{a}{2} * ZSS)}{(h+d)} \quad (17)$$

Waarin:	t'	:	de teruggang van de duintop
	ZSS	:	de zeespiegelstijging
	L	:	de afstand van de oorspronkelijke duintop tot het punt waarvoor geldt dat zeewaarts van dit punt geen profielaanpassingen optreden
	a	:	de helling van het duinfront
	h	:	de duinhoogte ten opzichte van de gemiddelde (oorspronkelijke) waterstand
	d	:	de diepte ten opzichte van de gemiddelde waterstand op afstand L van de duintop

Wanneer geldt $a=0$, dus wanneer het duinfront vertikaal zou zijn, dan geldt $t=t'$. Vergelijking (16) wordt dan gereduceerd tot:

$$t' = t = \frac{ZSS * L}{(h + d)} \quad (18)$$

De kustachteruitgang is dus onder meer afhankelijk van de breedte van het actieve kustprofiel. De mate van kustachteruitgang is dus sterk afhankelijk van de aannames die gedaan worden over de breedte van het actieve kustprofiel.

Maatregelen ter voorkoming van kustachteruitgang

Om te voorkomen dat de kust achteruit gaat moet het profiel opgehoogd worden. Dit dient te gebeuren vanaf de vastgestelde zeewaartse grens tot in principe de duintop. Wordt dit deel evenveel opgehoogd als de zeespiegelstijging bedraagt, dan is er geen sprake van kustachteruitgang. Dit is in figuur 2.6 aangegeven. Wel kan er, doordat de duintop lager komt te liggen ten opzichte van de gemiddelde zeespiegel, meer duinafslag plaatsvinden tijdens stormaanvallen. Aangezien de duinen vaak relatief hoog zijn, zal deze toename niet groot zijn.

2.3.3 Verandering van zandtransport

Door veranderende golfcondities

De zandtransporten, zowel in langs- als in dwarsrichting van de kust, zijn onder meer afhankelijk van de golfhoogte. Als de maatgevende golven hoger worden, dan zullen de transporten toenemen. Voor het langstransport is tevens de golfrichting van belang. Wanneer de zandtransporten toenemen kunnen ook de transportgradiënten toenemen. Hierdoor kan de erosie toenemen en zal er jaarlijks meer zand gesuppleerd moeten worden om de positie van de kustlijn te handhaven.

Door verhoogde rivierafvoer

Wanneer de rivieren meer water afvoeren, stroomt er meer zoet water de zee in. Het water aan de kust wordt dan minder zout. Dit is bijvoorbeeld het geval bij Hoek van Holland. Het minder zoute water verspreidt zich in noordelijke richting. Hierdoor ontstaat de situatie zoals geschetst in figuur 2.7. Zout water is zwaarder dan zoet water. Er stelt zich een verhang in om aan het evenwicht in horizontale zin te voldoen. Hierdoor ontstaat een circulatie van stromingen. Bij de bodem is deze stroming naar de kust gericht. Hierdoor neemt het kustgerichte dwarstransport toe. Dit effect is voor een onderzoek in het kader van Kustgenese nader onderzocht. Het is gebleken dat dit effect vrij groot is. Dit is een gunstige ontwikkeling voor de kust.

2.3.4 Toename zandvraag van kombergingsgebieden

Het gedrag van een systeem van een tidal inlet met een kombergingsgebied kan vaak begrepen worden met een evenwichtsbeschouwing. De afmetingen van de geulen en platen zijn afhankelijk van de hoeveelheid water die per getijcyclus in en uit het kombergingsgebied stroomt. Als de zeespiegel stijgt, zijn de geulen te diep. Er ontstaat een zandvraag om de geulen aan te passen. Voor een verondieping van de geulen worden vaak eerst de platen in een kombergingsgebied afgebroken. Daarnaast wordt ook van buiten het systeem zand

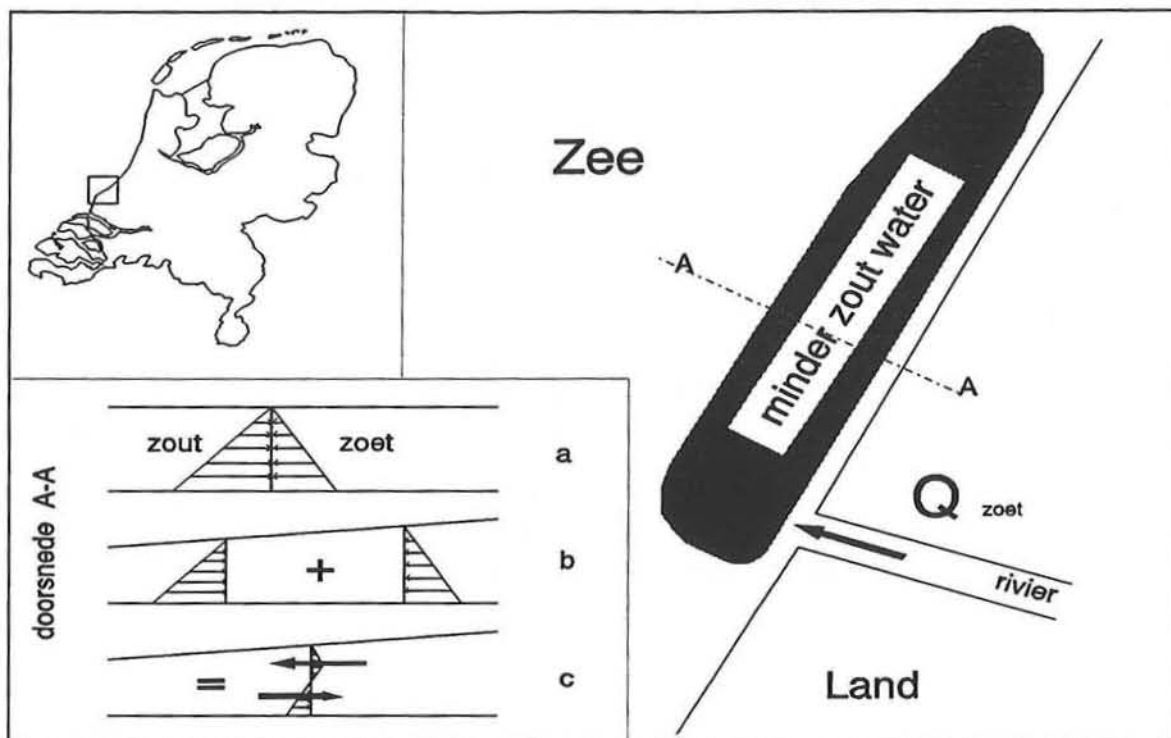


fig 2.7 Kustgericht dwarstransport door zoet water

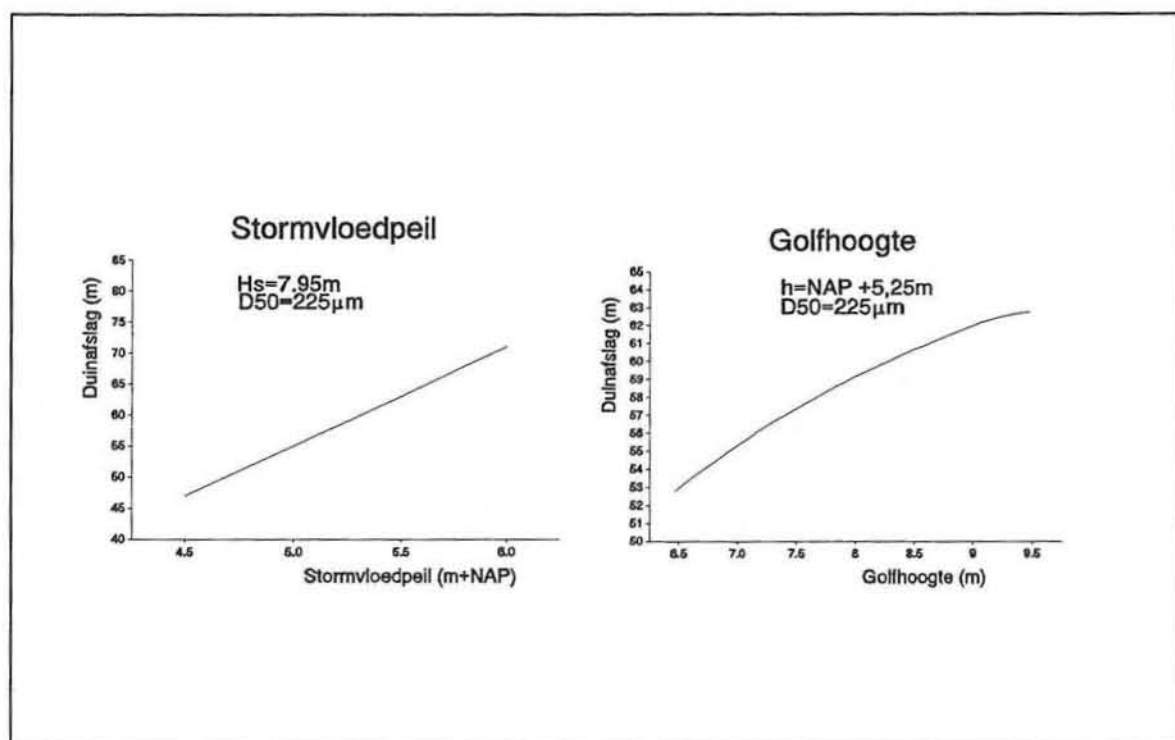


fig 2.8 Duinafslag als functie van stormvloedstanden en golfhoogtes

aangevoerd om de zandhonger te stillen.

De Waddenzee kan worden opgevat als een reeks van kombergingsgebieden. Nu al is de bodem van de Waddenzee in beweging. Jaarlijks komt er ongeveer $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sediment de Waddenzee binnen. Hiervan komt naar verwachting ongeveer $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ van de Noordzeekust van de eilanden. Bij een versnelde zeespiegelstijging zal de zandvraag van de Waddenzee toenemen. Wanneer er als eerste benadering wordt uitgegaan van een oppervlakte van 2000 km^2 en een zeespiegelstijging van $0,85 \text{ cm/jaar}$ dan komt de hoeveelheid zand, nodig om aan de zandvraag te voldoen, op $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. In hoofdstuk 8 worden voor de zandvraag andere waarden gebruikt afkomstig uit 'Het mysterie van de Wadden', RIKZ, 1994. Voor deze studie is het van belang te onderzoeken wat de gevolgen zijn van een toenemende zandvraag op de Noordzeekust van de Waddeneilanden. Het is denkbaar dat de erosie bij die kusten zal toenemen. Hierop wordt verder ingegaan in paragraaf 8.2.

De Oosterschelde is ook een kombergingsgebied. Met de aanleg van de stormvloedkering in de Oosterschelde is het natuurlijke evenwicht in de Oosterschelde ernstig verstoord. Door de verkleining van de doorstroomopening zijn de in- en uitstromende hoeveelheden water sterk afgenomen. Er is hierdoor een zandvraag ontstaan van $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Van deze hoeveelheid zal naar schatting $160 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ kunnen worden geleverd door de platen in de Oosterschelde. De afbraak van deze platen kan zeer ernstige gevolgen hebben voor de heersende biocultuur. Via de Oosterscheldekering wordt jaarlijks naar verwachting maximaal $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sediment naar binnen gebracht. Deze import wordt bepaald door de drempels van de kering met de bijbehorende ontgrondingskuilen en lijkt onafhankelijk van de zeespiegelstijging. Wordt voor de Oosterschelde een zelfde berekening gemaakt als voor de Waddenzee, dan wordt er, uitgaande van een oppervlak van 300 km^2 en een zeespiegelstijging van $0,85 \text{ cm/jaar}$ een jaarlijkse extra zandvraag gevonden van ongeveer $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Dit kan invloed hebben op de Zeeuwse kust.

Het platen- en geulensysteem van de Westerschelde kan ook worden opgevat als een evenwichtssysteem. Bij zeespiegelstijging zou ook hier een zandvraag kunnen ontstaan. Het is echter gebleken dat het voor het onderhoud van de vaargeul benodigde baggerwerk overheersend is t.o.v. andere processen waaronder zeespiegelstijging. Het systeem heeft sinds de laatste verdiepingen alleen maar zand geëxporteerd. Bij de aanstaande verdieping van de Westerschelde kan dus niets anders worden verwacht. Wat betreft de Westerschelde zal het effect van zeespiegelstijging op de kust dus klein zijn.

2.3.5 Toename duinafslag

Als de golfcondities veranderen, verandert ook de mate van duinafslag. Tevens is de mate van duinafslag afhankelijk van de stormvloedstand. Zoals in figuur 2.2 is weergegeven zal er, in het ongunstige geval dat de klimatologische omstandigheden verslechteren, rekening gehouden moeten worden met hogere stormvloedstanden. De mate waarin de duinafslag afhankelijk is van respectievelijk de golfhoogte en de stormvloedstand is aangegeven in figuur 2.8 (Van de Graaff, 1986). Figuur 2.8 geeft de uitwerking voor een specifiek geval wat beginprofiel en korreldiameter betreft. Onder de huidige omstandigheden zijn de Nederlandse duinen veilig. Dit houdt in dat er tijdens een maatgevende storm voldoende reserve-duinbreedte overblijft om de optredende waterstand te keren. Op sommige plaatsen is de reserve-duinbreedte zeer gering. Bij een toename van de hevigheid van stormen en een verhoogde zeespiegel zullen dus maatregelen nodig zijn om de veiligheid van de duinen als waterkering te garanderen. Deze

maatregelen zullen volgens het beleid van "dynamisch handhaven" bestaan uit extra zandsuppleties. Het is ook mogelijk de duinen landwaarts te verbreden om er zeker van te zijn dat er ook in de toekomst voldoende reserve-duinbreedte aanwezig is. De ruimte om deze verbreding uit te voeren moet dan wel aanwezig zijn. Eventueel moeten er planologische reserveringen voor dit doel in het duingebied worden gemaakt.

3 Dynamisch handhaven in de toekomst

3.1 Doel van dit onderzoek

3.1.1 Algemene doelstelling

Het is de bedoeling om te onderzoeken of het ook bij versnelde zeespiegelstijging in de toekomst mogelijk blijft de Nederlandse kust door middel van zandsuppleties op zijn plaats te houden. Daarbij moet naast het bepalen van de hoeveelheden zand die daarvoor nodig zijn, ook worden nagegaan of de veiligheid van de duinen als waterkering blijft gehandhaafd. Daarnaast moet worden nagegaan welke ruimte moet worden gereserveerd voor de waterkeringen.

3.1.2 Onderzoeksvragen

De volgende vragen zijn voor dit onderzoek relevant:

- 1 Hoeveel zand is er per tijdseenheid extra nodig om de kust op zijn plaats te houden?

In het vorige hoofdstuk is opgesomd met welke problemen de Nederlandse kust te maken krijgt bij zeespiegelstijging. Deze problemen kunnen verholpen worden door extra zandsuppleties.

- 2 Tot welk scenario kan dat worden bijgehouden? Is er een grens aan te geven waarbij het reëel niet meer haalbaar is het zand kunstmatig aan te voeren?

- 3 Waar moet het zand worden aangebracht? En waar moet het vandaan komen?

Er zijn verschillende manieren om suppleties uit te voeren. In bijlage I worden enkele voorbeelden genoemd. Er wordt ook aandacht besteed aan de plaats waar het zand gewonnen kan worden en de gevolgen daarvan.

- 4 Hoe snel verlopen de aanpassingsprocessen in dwarsrichting wanneer er op één plaats wordt gesuppleerd?

- 5 Zijn er tijdens die aanpassingsprocessen nog kritische tijdstippen aan te wijzen met het oog op duinafslag bij storm?

- 6 Welk ruimtebeslag moet nu al worden gereserveerd voor veilige waterkeringen in de toekomst?

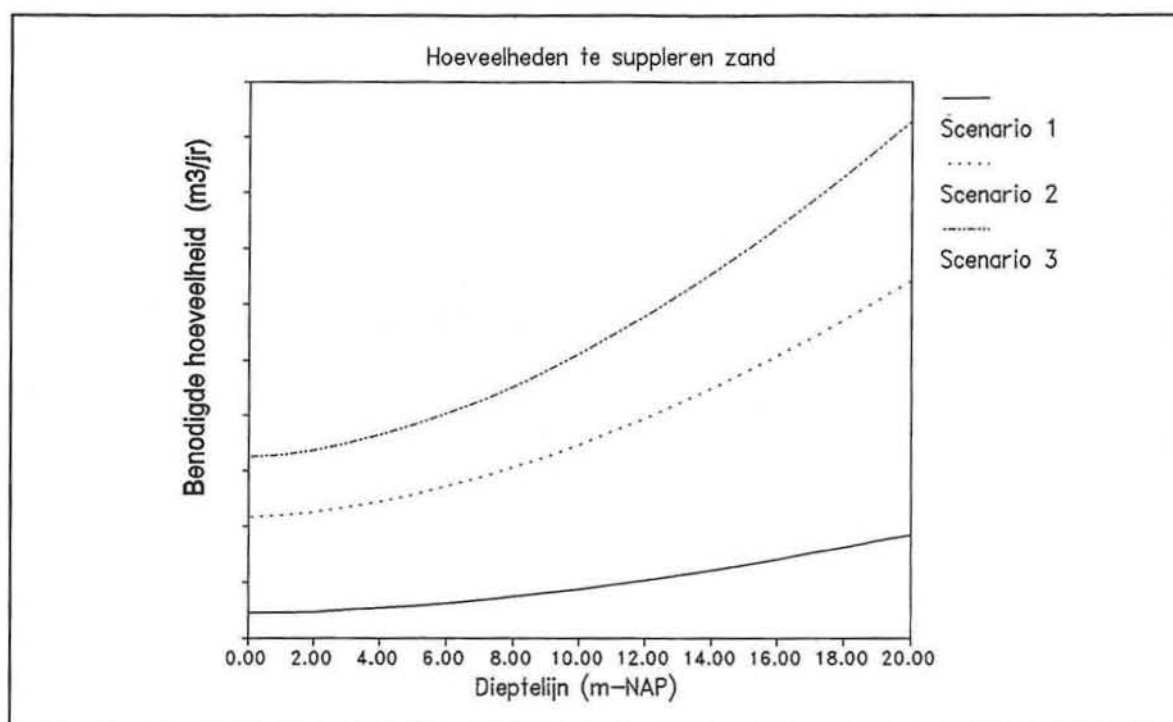


fig 3.1 Hoeveelheden zand bij suppleren tot gegeven dieptelijn

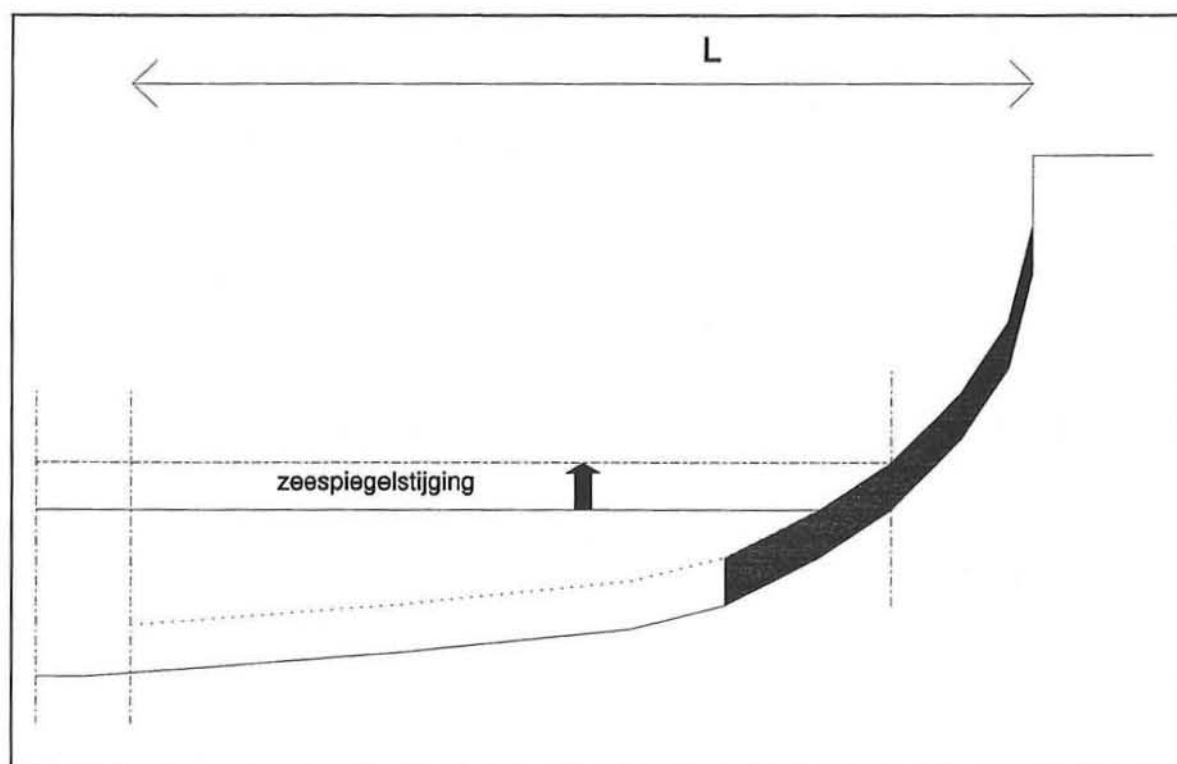


fig 3.2 Toestand bij uitgestelde aanleg

3.2 Aanpak van het onderzoek

In deze paragraaf zal duidelijk worden gemaakt op welke manier er een antwoord is gegeven op de onderzoeksvragen. Het onderzoek is gesplitst in verschillende delen. Deze delen worden in de volgende paragrafen gespecificeerd.

3.2.1 Bepaling hoeveelheden zand die nodig zijn om de zeespiegelstijging te volgen

Zoals in het voorafgaande is gebleken, is de hoeveelheid zand die in de toekomst gesuppleerd moet worden afhankelijk van de in rekening te brengen profiellengte (zie paragraaf 2.3.2). Het is dus van belang uit te zoeken in hoeverre de vooroever invloed heeft op de kustlijn. Eerst is echter nagegaan welke hoeveelheid zand gesuppleerd moet worden bij aanvulling tot een bepaalde dieptelijn. Dit is gebeurd met behulp van de Jarkus-bestanden. In grafiekvorm ziet dit er ongeveer uit zoals in figuur 3.1 is aangegeven. Uit deze beschouwing is gebleken hoe groot de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand is voor elk scenario bij aanvulling tot een willekeurige dieptelijn.

3.2.2 Beschouwing van de plaats waar de suppleties uitgevoerd worden

Er kan voor gekozen worden de suppleties niet in de buurt van de waterlijn uit te voeren maar op dieper water. Dit is eenvoudiger in uitvoering en dus goedkoper. De natuur zal dan het zand naar de kust transporteren. Voor een dergelijke suppletie-methode is door de lagere effectiviteit (zie paragraaf 5.2.1) echter wel meer zand nodig. Tevens is van belang hoe snel de aanpassingsprocessen in dwarsrichting verlopen. Dit is vooral van belang omdat het uitgangspunt is dat de veiligheid steeds gehandhaafd moet blijven. Op veiligheid wordt in paragraaf 3.2.3 dieper ingegaan.

3.2.3 Controle van de veiligheid van de duinen

Toetsing bij veranderende ontwerpomstandigheden

Voor de toetsing van de veiligheid van de duinen als waterkering is een leidraad opgesteld (TAW, 1984). Aan de hand van deze leidraad is de veiligheid van de duinen met behulp van het computerprogramma DUNES getoetst. Dit is gebeurd met de ontwerpparameters zoals die gegeven zijn in hoofdstuk 2 voor de jaren 2090 en 2190.

Toetsing bij uitgestelde aanleg

Er kan voor worden gekozen de kustlijn te handhaven door regelmatig ter plaatse van de waterlijn een beperkte hoeveelheid zand te suppleren. Er ontstaat dan een situatie zoals geschetst in figuur 3.2. Op deze manier blijft de kustlijn op zijn plaats. Het profiel verder zeewaarts is echter nog niet opgehoogd. In de loop der tijd zal het zand zich ook naar dieper water verspreiden. Als er verspreiding heeft plaatsgevonden, moet er ter plaatse van de waterlijn weer worden gesuppleerd om de kustlijn op zijn plaats te houden. Dit is een manier van omgaan met de onzekerheid over de afstand waarover het profiel moet worden opgehoogd.

Het kan echter gebeuren dat er een zeer zware storm optreedt terwijl het profiel nog de vorm heeft zoals geschetst is in figuur 3.2. De duinafslag zal dan groter zijn dan wanneer het profiel in zijn geheel (over de afstand L) zou zijn opgehoogd. Er is dan ook nagegaan of de veiligheid bij uitgestelde aanleg gewaarborgd blijft. De toetsing zoals die hierboven is beschreven, is bij de drie scenario's gedaan.

Ruimtebeslag van de waterkeringen

Naar aanleiding van de beschouwingen zoals die eerder zijn beschreven in deze paragraaf zou kunnen blijken dat de veiligheid op termijn niet altijd gewaarborgd blijft. Om de veiligheid te garanderen zijn dan maatregelen nodig. Een maatregel zou kunnen zijn de duinen, op plaatsen waar dat nodig is, landinwaarts te verbreden. De ruimte die daarvoor nodig is moet dan wel beschikbaar zijn. Het is dus van belang voldoende ruimte te reserveren voor de waterkeringen in de toekomst.

3.2.4 Analyse van het langstransport langs de Nederlandse kust

In paragraaf 2.3.3 is beschreven hoe bij verandering van de golfcondities, het langstransport zal veranderen. Deze verandering is nader onderzocht. Hiertoe is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met behulp van het computermodel Unibest. De parameters die zijn gebruikt zijn de golfhoogte, de golfperiode, golfrichting en de korreldiameter van het suppletiezand. Eerst zijn de parameters ingevoerd zoals die nu gelden. Daarna zijn alle parameters afzonderlijk veranderd. Hierdoor is een beeld verkregen van de invloed van de verschillende parameters

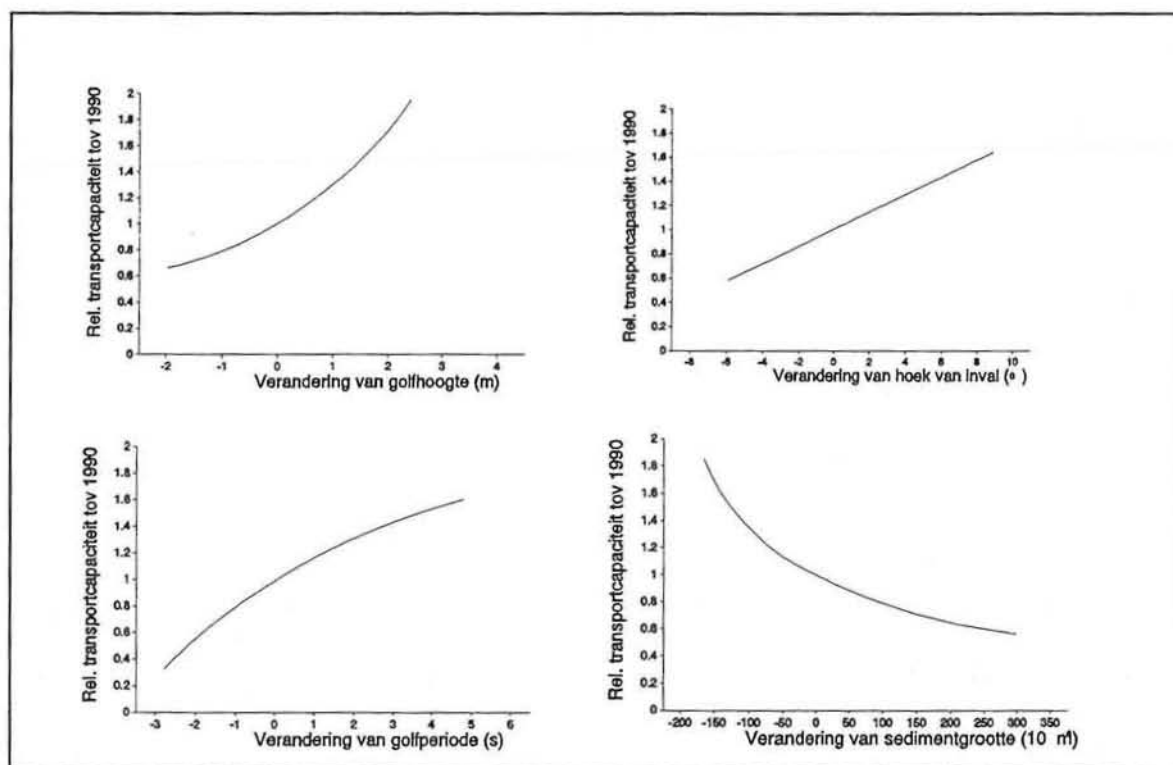


fig 3.3 Gevoeligheidsanalyse van langstransport

op het langtransport. In grafiekvorm ziet dit beeld er ongeveer uit zoals geschetst in figuur 3.3. Uit de resultaten van een dergelijke analyse valt af te leiden of het te verwachten is dat de erosie langs de Nederlandse kust drastisch zal toenemen bij veranderende golfcondities. Wanneer dit het geval is, zal dit gevolgen hebben voor de hoeveelheden zand die moeten worden gesuppleerd.

3.2.5 Beschouwing van de processen in de Waddenzee en langs de Zeeuwse kust

In hoofdstuk 2 is beschreven dat er in de Waddenzee en bij de Zeeuwse kust andere processen een rol spelen dan bij de Hollandse kust. De zandvraag die in deze gebieden zou kunnen ontstaan, kan gevolgen hebben voor de kustlijn. Wanneer de kust zand zal leveren om aan de zandvraag te voldoen dan treedt er erosie op. Deze erosie zal volgens het handhavingsbeleid moeten worden gecompenseerd met extra zandsuppleties. Om een beeld te krijgen van de totale hoeveelheden jaarlijks te suppleren zand is een schatting gemaakt van de consequenties voor de kust van de eventueel toenemende zandvraag.

3.2.6 Beschouwing van de bepaalde hoeveelheden suppletiemateriaal

Uit bovenstaande beschouwingen is gebleken wat de toename is van de hoeveelheden zand die nodig zijn om de Nederlandse kust op zijn plaats te houden. Het was niet de bedoeling van deze studie om uitgebreide kosten-analyses te maken. Wel is nagegaan wat de relatieve toename van de jaarlijks uit te voeren zandsuppleties is. Aan de hand van een dergelijke beschouwing is na te gaan wat de consequenties van het huidige handhavingsbeleid zijn. In deze studie is een periode van 200 jaar in beschouwing genomen. Nagegaan is wat de verwachtingen zijn voor de jaren 2090 en 2190.

Een ander aspect van de haalbaarheid van het vastgestelde kustbeleid is dat de hoeveelheden zand die nodig zijn, ook ergens vandaan moeten komen. Het is de vraag of de bronnen waar momenteel zand wordt gewonnen ten behoeve van het kustonderhoud ook in de toekomst toereikend blijven. Als dit niet het geval is zal naar andere bronnen moeten worden gezocht. Dit kan gevolgen hebben voor de kosten. Wanneer zand van een grote afstand uit de kust moet worden gehaald, zijn de transportkosten hoger. Wanneer wordt gesuppleerd met zand dat een andere korreldiameter heeft dan het oorspronkelijk aanwezige zand dan zullen de te suppleren hoeveelheden veranderen. In de regel worden suppleties uitgevoerd met sediment dat zoveel mogelijk gelijk is aan het aanwezige sediment.

3.2.7 Aanpassingen definitie Basiskustlijn

Als er sprake van is dat de zeespiegel in belangrijke mate stijgt, dient dat consequenties te hebben voor de grenzen die bij de definiëring van de Basiskustlijn (en de Momentane en de te Toetsen kustlijn) een rol spelen. In paragraaf 9.4 wordt daar nader op ingegaan.

4 Bepaling hoeveelheden zand om zeespiegelstijging te volgen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is berekend hoeveel zand er nodig is om de zeespiegelstijging te volgen. Hierbij is de Bruun-benadering (Bruun, 1954) als uitgangspunt genomen. Dat wil zeggen dat kustlijnachteruitgang wordt voorkomen door het evenwichtsprofiel kunstmatig te handhaven. Erosie- en aanzandingsprocessen door gradiënten in het langtransport worden in deze berekening niet meegenomen.

4.2 Algemene berekeningswijze

In deze paragraaf zal de algemene methode uiteengezet worden die gehanteerd is om de hoeveelheden zand te bepalen die per scenario nodig zijn voor het ophogen van het dwarsprofiel tot een willekeurige dieptelijn. In paragraaf 2.3.2 is al uitgelegd dat er van uitgegaan wordt dat, om het dwarsprofiel hetzelfde te houden, het profiel vanaf de duintop tot de gewenste dieptelijn zal moeten worden opgehoogd met een waarde die gelijk is aan de zeespiegelstijging van het gekozen scenario. Dit is in figuur 4.1 geschetst. Met behulp van de Jarkus-bestanden zijn dwarsprofielen per kustvak bepaald. Er is hierbij uitgegaan van de definitie-schets zoals aangegeven in figuur 4.2. Als nulpunt voor de x-as geldt de RSP-lijn. Als nulpunt voor de y-as geldt NAP. De positieve x-as loopt in zeewaartse richting. De positieve y-as loopt omhoog. Voor de ligging van de duintop is een hoogte van NAP +10 m gekozen. De afstand a_1 is de afstand vanaf de RSP-lijn tot aan de grens van de actieve zone. Omdat de actieve zone niet éénduidig vastligt is er voor gekozen de resultaten te presenteren bij ophoging tot elke willekeurige dieptelijn tussen NAP en NAP - 20 m. De afstand a_2 is de afstand vanaf de RSP-lijn tot aan de aangenomen duintop. De afstanden a_1 en a_2 opgeteld geeft de totale afstand A. Een kustvak is opgedeeld in verschillende raaien. Per raai kan de afstand A berekend worden. Vervolgens wordt A vermenigvuldigd met een breedte gelijk aan de afstand tussen twee opeenvolgende raaien. Dit is verduidelijkt in figuur 4.3. Er is nu per raai een oppervlak berekend. Door deze oppervlaktes te vermenigvuldigen met de zeespiegelstijging uit het gekozen scenario en deze waarden vervolgens op te tellen, wordt de hoeveelheid zand per kustvak verkregen. In formule-vorm ziet dat er als volgt uit:

$$S_{\text{kustvak},j} = \sum_{i=1}^{i=N} (A_i * b_i * ZSS_j) \quad (19)$$

Waarin:	N	:	aantal raaien in kustvak
	i	:	raainummer
	j	:	scenarionummer
	$S_{\text{kustvak},j}$	:	hoeveelheid zand (in m^3/jr) die nodig is in het kustvak bij een zeespiegelstijging volgens scenario j.
	A_i	:	afstand (in m) van gekozen dieptelijn tot gekozen duintop in raai i.
	b_i	:	meewerkende breedte (in m) van raai i (zie figuur 4.3).
	ZSS_j	:	zeespiegelstijging (in m/jr) volgens scenario j.

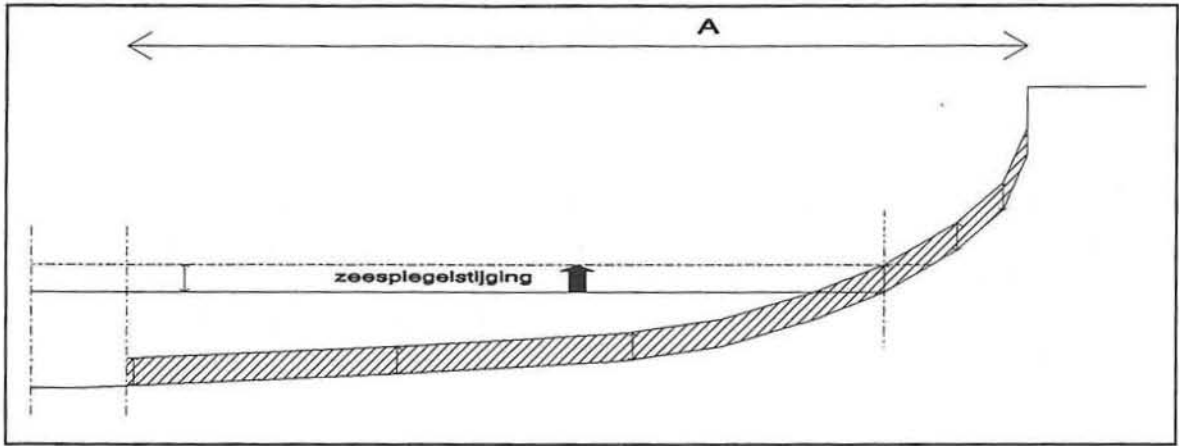


fig 4.1 Ophoging profiel van duintop tot dieptelijn

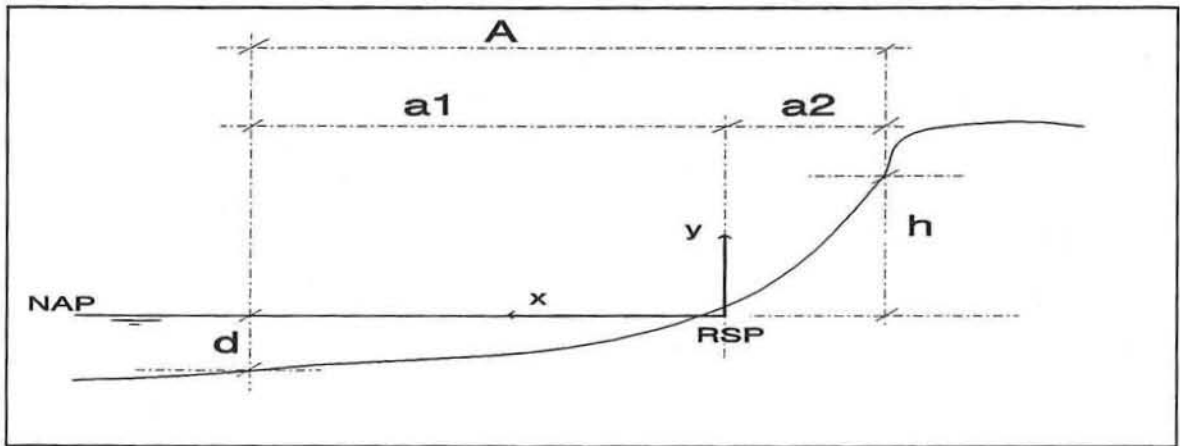


fig 4.2 Definitie-schets

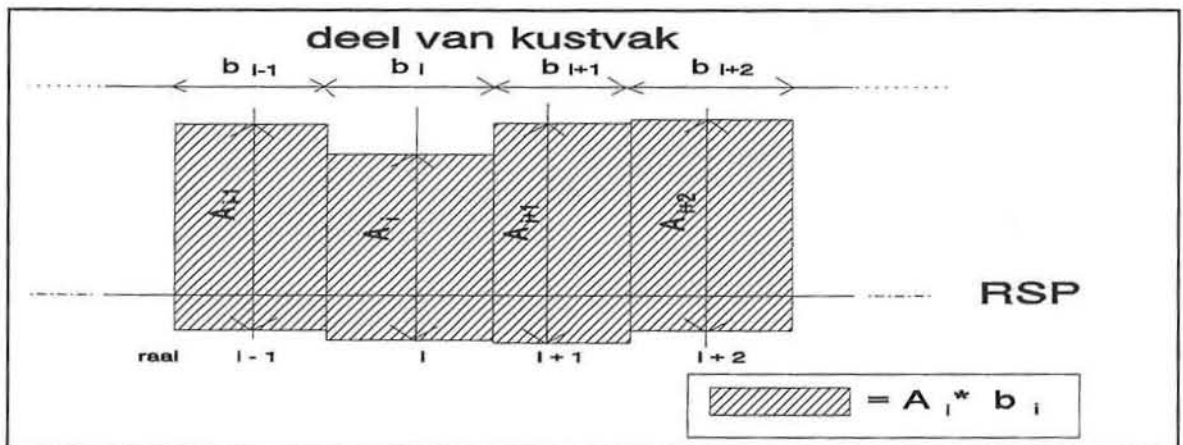


fig 4.3 Oppervlak per raai

Om de kustvakken onderling te kunnen vergelijken zijn de uitkomsten gedeeld door de breedte van het betreffende kustvak. Deze breedte B is gelijk aan:

$$B = \sum_{i=1}^{i=N} b_i \quad (20)$$

4.3 Resultaten

De berekeningen zijn gebaseerd op de Jarkusmetingen van 1993 en de doorlodingen van 1990. In de figuren 4.4 en 4.5 zijn voor de verschillende kustvakken de resultaten van bovenstaande berekeningen uitgezet. In deze grafieken kan per dieptelijn de gemiddelde benodigde hoeveelheid zand per jaar per meter breedte worden afgelezen. Voor het kustvak Schouwen waren geen meetgegevens beschikbaar voor waterdieptes beneden NAP -5 m. Om het gemiddelde voor de hele Nederlandse kust te kunnen bepalen zijn de meetgegevens geëxtrapoleerd. Deze extrapolatie brengt een onzekerheid met zich mee. Overigens geldt voor verschillende kustvakken dat de dieptemetingen niet tot de NAP -20 m lijn reiken. Op plaatsen waar dat mogelijk en nodig was, is voor de ligging van de dieptelijnen geëxtrapoleerd. Over het algemeen kan gesteld worden dat hierdoor de nauwkeurigheid van de resultaten bij suppleren tot een dieptelijn tussen de NAP -12 m en NAP -20 m kleiner is dan voor de resultaten bij suppleren tot een dieptelijn boven de NAP -12 m. Wegens gebrek aan gegevens is het kustvak Schiermonnikoog verwaarloosd.

Uit de berekeningen blijkt dat naarmate de dwarsprofielen flauwer worden, er meer zand nodig is om de zeespiegelstijging te volgen. Wanneer een profiel flauwer is, is de afstand tot een bepaalde dieptelijn immers groter. Het lijkt paradoxaal dat er voor steile profielen, waar in de praktijk vaak het eerst problemen optreden, minder zand nodig is dan voor flauwe profielen. Dit is echter inherent aan de gekozen methode.

De waarden uit de grafieken in de figuren 4.4 en 4.5 zijn opgeteld. Dit levert de totale hoeveelheid zand die per jaar nodig is om de gehele Nederlandse kust op te hogen tot een bepaalde dieptelijn met een waarde gelijk aan het gekozen scenario. Deze hoeveelheden zijn in de tabellen 4.1, 4.2 en 4.3 weergegeven. De totale hoeveelheden gedeeld door de totale breedte (354 km) van alle kustvakken samen, levert een gemiddelde hoeveelheid per strekkende meter. De totale lengte van de Nederlandse kust bedraagt 432 km. Deze kustlengte bestaat uit zeegaten en kust met achterland.

De totale breedte van alle kustvakken samen is gelijk aan de kustlengte met achterland (354 km). Hier zitten dus ook de kustgedeelten bij die door andere zeeweringen (zeedijken/strandvlakten) dan duinen beschermd worden. Deze kustgedeelten worden formeel niet meegenomen in het handhavingsbeleid. Toch zullen deze kustgedeelten ook een deel van het suppletiezand naar zich toe trekken en kunnen derhalve dus niet zonder meer verwaarloosd worden. Door een effectieve kustlengte van 354 km in rekening te brengen, wordt een soort van bovengrens voor de jaarlijks extra te suppleren hoeveelheden zand gevonden. Als ondergrens kan worden uitgegaan van alleen de lengte van de Nederlandse duinenkust (254 km). Hiertoe zijn de waarden per strekkende meter vermenigvuldigd met de lengte van de Nederlandse duinenkust (254 km).

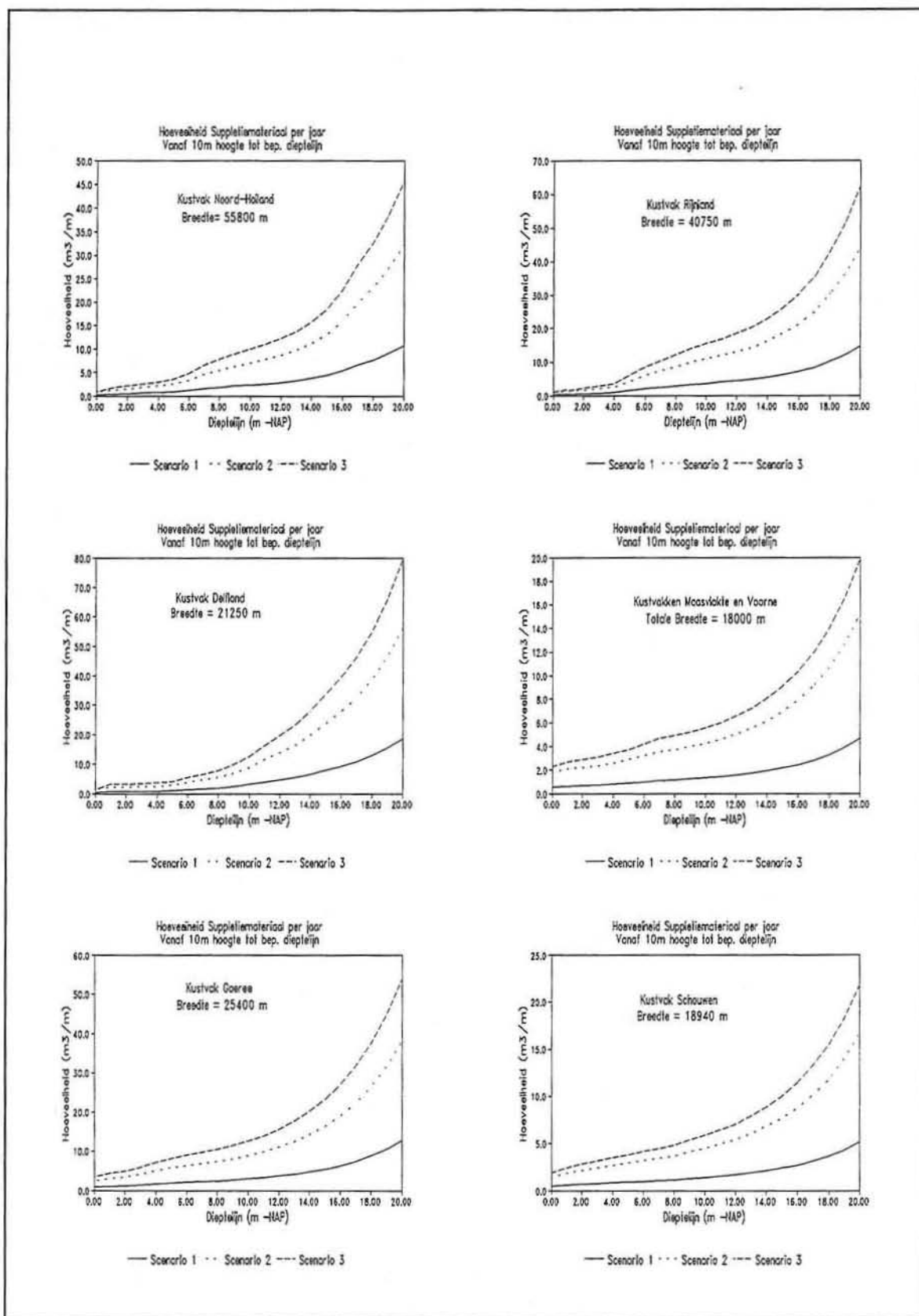


fig 4.4 Hoeveelheden benodigd suppletiemateriaal per meter breedte per kustvak

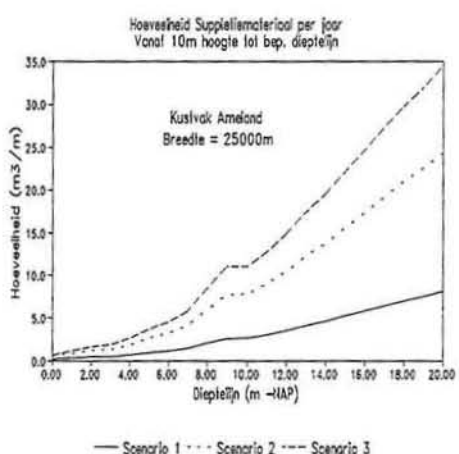
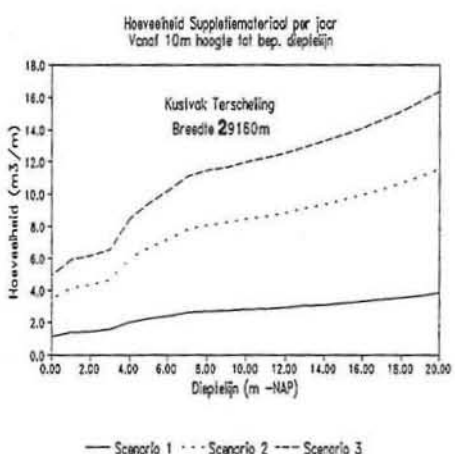
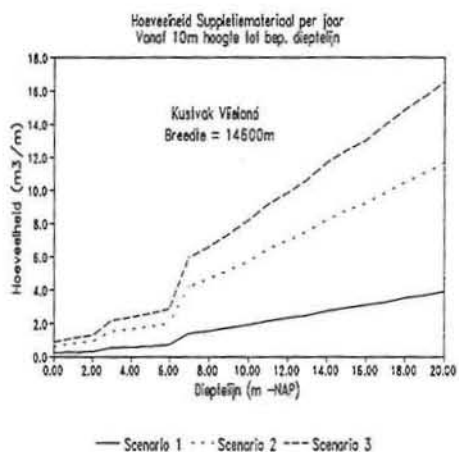
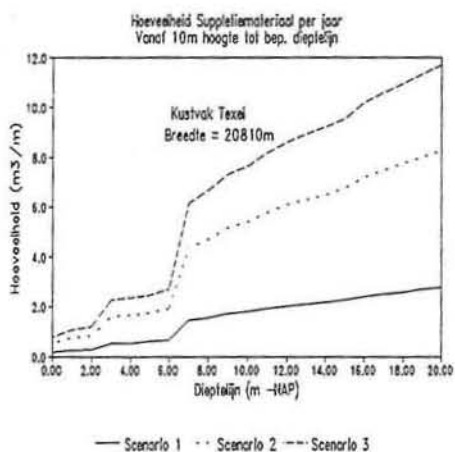
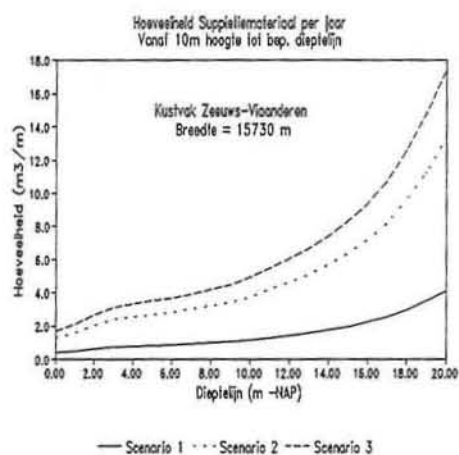
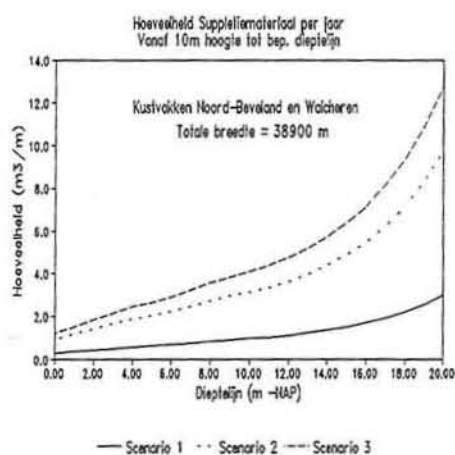


fig 4.5 Hoeveelheden benodigd suppletiemateriaal per meter breedte per kustvak

Scenario 1 20cm/eeuw	Totaal over totale breedte van 354 kilometer van alle kustvakken (10 ³ m3)	Gemiddeld over totale breedte van 354 kilometer van alle kustvakken (m3/m)	Totaal over totale lengte van 254 kilometer van duinenkust (10 ³ m3)
Dieptelijn (m -NAP)			
0	173,3	0,49	124,3
1	220,9	0,62	158,3
2	251,7	0,71	180,4
3	290,6	0,82	208,3
4	352,4	0,99	252,6
5	417,9	1,18	299,6
6	492,0	1,39	352,7
7	598,5	1,69	429,0
8	674,6	1,90	483,6
9	754,7	2,13	541,0
10	819,7	2,31	587,6
11	902,9	2,55	647,3
12	994,4	2,81	712,8
13	1098,1	3,10	787,1
14	1224,5	3,46	877,7
15	1383,9	3,91	992,0
16	1576,2	4,45	1129,8
17	1813,3	5,12	1299,9
18	2092,1	5,90	1499,6
19	2419,2	6,83	1734,1
20	2828,0	7,98	2027,2

Tabel 4.1 Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 1

Scenario 2 60cm/eeuw	Totaal over totale breedte van 354 kilometer van alle kustvakken (10 ³ m3)	Gemiddeld over totale breedte van 354 kilometer van alle kustvakken (m3/m)	Totaal over totale lengte van 254 kilometer van duinen-kust (10 ³ m3)
Dieptelijn (m -NAP)			
0	520,1	1,47	372,8
1	662,6	1,87	475,0
2	755,2	2,13	541,3
3	871,8	2,46	624,9
4	1057,1	2,98	757,7
5	1253,8	3,54	898,8
6	1476,0	4,17	1058,1
7	1795,5	5,07	1287,1
8	2023,8	5,71	1450,7
9	2264,0	6,39	1622,9
10	2459,2	6,94	1762,8
11	2708,8	7,64	1941,8
12	2983,3	8,42	2138,5
13	3294,2	9,30	2361,3
14	3673,4	10,37	2633,2
15	4151,6	11,72	2976,0
16	4728,5	13,34	3389,5
17	5440,1	15,35	3899,6
18	6276,2	17,71	4498,9
19	7257,6	20,48	5202,4
20	8484,0	23,94	6081,6

Tabel 4.2 Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 2

Scenario 3 85cm/eeuw	Totaal over totale breedte van 354 meter van alle kustvakken (10 ³ m3)	Gemiddeld over totale breedte van 354 meter van alle kustvakken (m3/m)	Totaal over totale lengte van 254 kilometer van duinenkust (10 ³ m3)
Dieptelijn (m -NAP)			
0	736,7	2,08	528,1
1	938,7	2,65	672,9
2	1069,8	3,02	766,9
3	1235,0	3,49	885,3
4	1497,5	4,23	1073,5
5	1776,2	5,01	1273,2
6	2091,1	5,90	1498,9
7	2543,6	7,18	1823,3
8	2867,1	8,09	2055,2
9	3207,4	9,05	2299,1
10	3483,9	9,83	2497,4
11	3837,5	10,83	2750,8
12	4226,4	11,93	3029,6
13	4666,7	13,17	3345,2
14	5204,0	14,69	3730,3
15	5881,5	16,60	4216,0
16	6698,7	18,90	4801,8
17	7706,7	21,75	5524,4
18	8891,3	25,09	6373,5
19	10281,6	29,02	7370,1
20	12019,0	33,92	8615,5

Tabel 4.3 Hoeveelheden zand per jaar bij scenario 3

4.4 Samenvatting van de resultaten

De uiteindelijke resultaten zijn gepresenteerd in figuur 4.6.

Uit figuur 4.6 kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat wanneer de kust wordt opgehoogd tot de NAP -8 m lijn, bij een zeespiegelstijging van 0,60 m/eeuw, er per jaar ongeveer $1,4 \cdot 10^6$ m³ nodig is om de zeespiegelstijging te volgen (zie ook tabel 4.2). Momenteel wordt er jaarlijks ongeveer $6,5 \cdot 10^6$ m³ gesuppleerd. Aangezien de huidige trend een zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw laat zien, kan er van worden uitgegaan dat de hoeveelheid zand die nodig is om kustlijnachteruitgang ten gevolge van deze zeespiegelstijging te compenseren, bij deze waarde van $6,5 \cdot 10^6$ m³ per jaar is inbegrepen. Volgens tabel 4.1 is voor een zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw ongeveer $0,48 \cdot 10^6$ m³ per jaar nodig. Bij een zeespiegelstijging van 0,60 m/eeuw is er dus $6,5 \cdot 10^6 - 0,48 \cdot 10^6 + 1,45 \cdot 10^6 = 7,47 \cdot 10^6$ m³ per jaar nodig. Dit betekent een toename in de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand van 15 %. In figuur 4.6 is te zien dat de toename van de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand tot de NAP -12 m lijn geleidelijk toeneemt. Wanneer gesuppleerd zou moeten worden tot een grotere diepte dan neemt de hoeveelheid steeds sneller toe. Als er van wordt uitgegaan dat suppleren tot de NAP -12 m lijn zeker voldoende is om de kustlijn te handhaven dan betekent dat dat er in het ongunstigste geval (scenario 3) jaarlijks ongeveer $3,03 \cdot 10^6$ m³ zand gesuppleerd moet worden om de zeespiegelstijging te volgen. Er van uitgaande dat de in dit geval benodigde hoeveelheid van $0,71 \cdot 10^6$ m³/jr om de zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw te volgen ook nu is inbegrepen bij de $6,5 \cdot 10^6$ m³ die momenteel jaarlijks wordt gesuppleerd, dan bedraagt de toename in dit geval 36 %. Voor scenario 2 is er bij suppleren tot de NAP -12 m lijn ongeveer $2,14 \cdot 10^6$ m³ (+22 %) nodig. Bij scenario 1 is er geen sprake van een toename omdat de jaarlijks benodigde hoeveelheid suppletiemateriaal om de zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw te volgen al in de $6,5 \cdot 10^6$ m³ zit die momenteel jaarlijks wordt gesuppleerd.

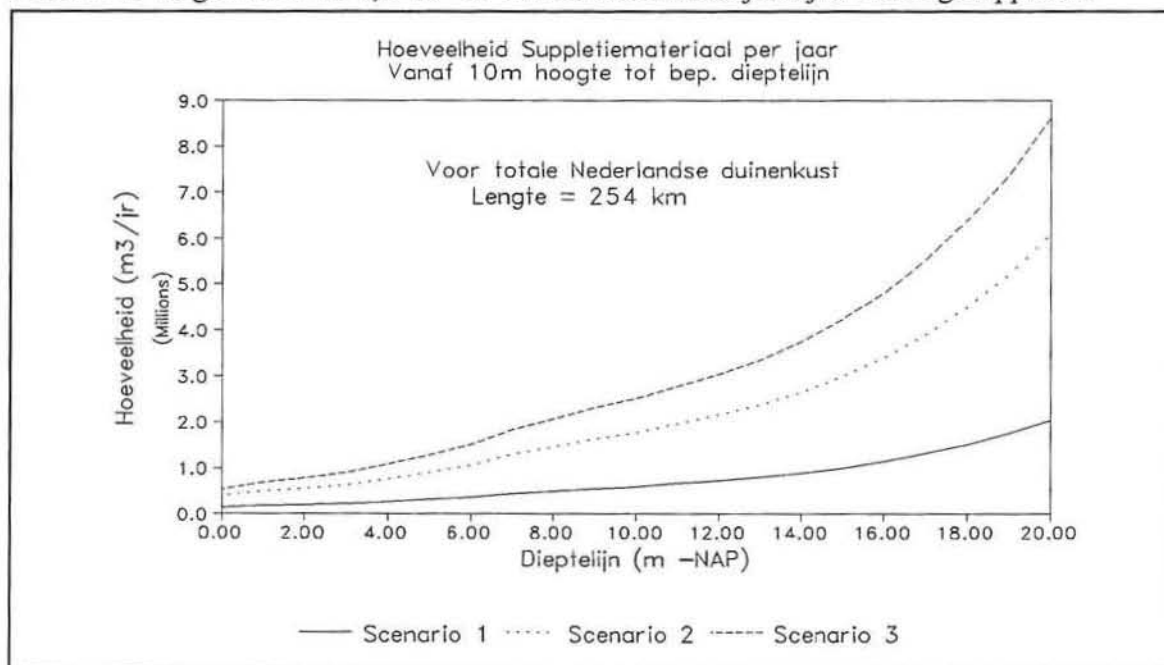


fig 4.6 Totaal benodigde hoeveelheid zand per jaar voor de totale kust

Er zou voor kunnen worden gekozen om in de toekomst alleen ter plaatse van de waterlijn te suppleren zodat de kustlijn op zijn plaats blijft en dus niet het gehele profiel wordt opgehoogd. Dit geeft in eerste aanleg een besparing op de hoeveelheid zand die gemiddeld jaarlijks moet worden gesuppleerd. Dat heeft misschien wel consequenties voor de veiligheid. Hier wordt in hoofdstuk 6 verder op ingegaan.

Overigens is in de voorgaande beschouwing in het geheel geen rekening gehouden met de toename van de zandhoeveelheden in de nu reeds aanzandende kustvakken (Totale sedimentatie $4,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar; zie tabel 2.2). Thans verplaatst de kustlijn zich in duidelijk aanzandende kustvakken vaak in zeewaartse richting. Bij versnelde zeespiegelstijging zal dat niet meer, of in mindere mate, het geval zijn. Het is in dit verband dus aan te nemen dat tenminste een deel van de genoemde $4,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ op de berekende volumina om de zeespiegelstijging te volgen in mindering kan worden gebracht.

5 De uitvoering van de suppleties

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn volgens de Bruun-benadering suppletiehoeveelheden bepaald die nodig zijn om de zeespiegelstijging te volgen. Hierbij werd er van uitgegaan dat om de ligging van de kustlijn steeds te handhaven het profiel vanaf de duintop tot aan de gekozen dieptelijn gelijkmatig wordt opgevuld. In de praktijk zal het echter zo zijn dat er of hoog in het dwarsprofiel (strandsuppletie) wordt gesuppleerd of zowel op het strand als op de vooroever. De vraag is nu of dit tot problemen leidt in verband met de veiligheid van de duinen als waterkering.

5.2 Vooroeversuppleties

Eén manier om een suppletie aan te brengen is door de benodigde hoeveelheid direct op de vooroever aan te brengen. Doordat deze methode van suppleren eenvoudiger is dan suppleren op het strand, is dit goedkoper. Problemen met deze methode zijn echter dat er ten eerste meer zand nodig is om het gewenste effect te bereiken, oftewel de effectiviteit van vooroeversuppleties wordt vaak lager ingeschat, en ten tweede dat het kustonderhoud een vertraging ondervindt. In paragraaf 5.2.1 wordt op deze problemen dieper ingegaan.

5.2.1 De effectiviteit van vooroeversuppleties

In de serie onderbouwende nota's van de nota "Kustverdediging na 1990" is in Technisch Rapport 14 een onderzoek opgenomen van het Waterloopkundig Laboratorium naar onderwateroeversuppleties oftewel vooroeversuppleties. Hierin is onder andere de effectiviteit van vooroeversuppleties onderzocht. De effectiviteit van een suppletie voor een bepaalde kuststrook wordt in dit Technische Rapport gedefinieerd als de volumetoeename per meter kustlengte van de betreffende strook ten opzichte van de autonome ontwikkeling, uitgedrukt als percentage van het aangebrachte volume per meter kustlengte. De aldus gedefinieerde effectiviteit bleek voornamelijk bepaald te worden door de aanlegdiepte. Het verband tussen de aanlegdiepte en de effectiviteit van een suppletie is aangegeven in figuur 5.1. Het eventuele effect van langtransport is hierbij buiten beschouwing gelaten. In de figuur wordt ook aangegeven dat ook bij strandsuppleties de effectiviteit niet 100 % is. De effectiviteit hangt niet af van de grootte van de uitgevoerde suppletie. Ook het winnen van zand op dieper water bleek bij die studie geen nadelig effect op de effectiviteit te hebben. Tevens is gebleken dat de zeespiegelstijging geen invloed heeft op de effectiviteit van vooroeversuppleties.

5.2.2 Langtransport

Wanneer langtransport wel in de beschouwing wordt betrokken, dan blijkt dat door het langtransport een herverdeling langs de kust plaatsvindt. Naarmate de suppletie over een groter kustdeel wordt uitgevoerd, wordt dit effect relatief kleiner. Wanneer de suppletie in het actieve kustprofiel wordt uitgevoerd, dan profiteren aangrenzende kustvakken van de herverdeling in langsrichting. Landwaarts van een hoog uitgevoerde vooroeversuppletie kunnen de langtransporten enigszins veranderen. Daardoor zou er bijvoorbeeld saliëntvorming

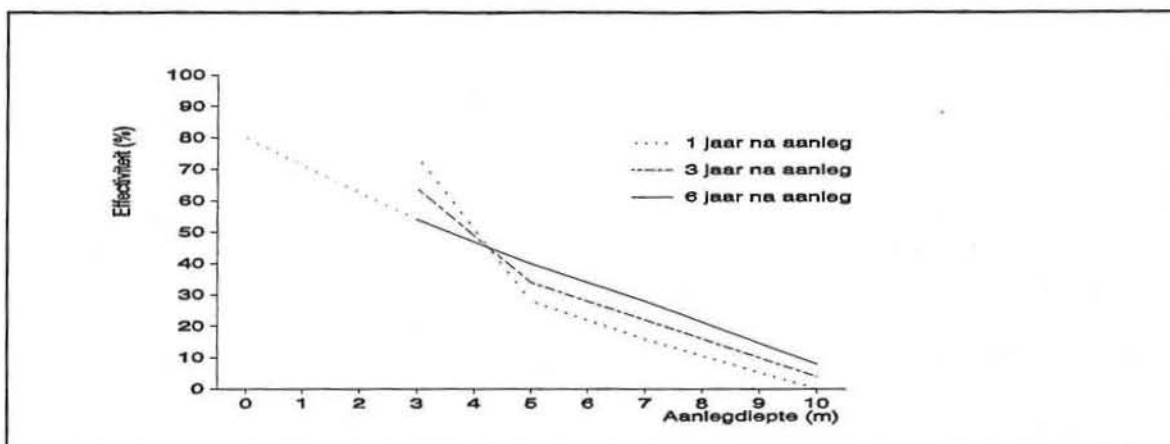


fig 5.1 Effectiviteit van suppletie bij bepaalde aanlegdiepte ("Kustbeleid na 1990"; TR 14)

Diepte t.o.v. NAP (m)	Effectiviteit (%)
3	55
5	40
7	25
10	<5

Tabel 5.1 Effectiviteit na vijf jaar ("Kustbeleid na 1990"; TR 14)

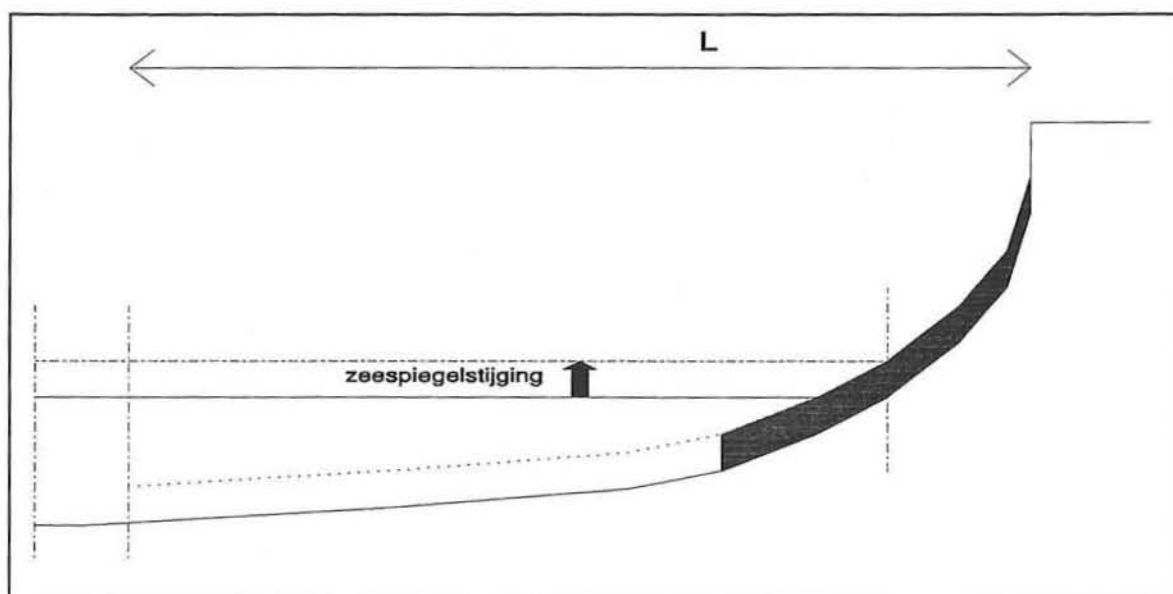


fig 5.2 Uitgestelde aanleg

kunnen optreden. Dit is gunstig voor het betreffende kustvak maar kan erosie in aangrenzende kustvakken tot gevolg hebben. Er mag van worden uitgegaan dat langtransportprocessen niet veel invloed hebben op de effectiviteit van vooroeversuppleties.

5.2.3 Conclusies

In tabel 5.1 is de effectiviteit van een vooroeversuppletie vijf jaar na uitvoering aangegeven. Uit deze tabel blijkt dat de effectiviteit van een suppletie kleiner wordt naarmate de suppletie verder van de kust wordt uitgevoerd. De kosten per m^3 nemen echter ook af. Het hoeft dus niet zo te zijn dat de goedkoopste oplossing dicht bij de kust ligt. Vooroeversuppleties zijn financieel gezien dus een goed alternatief voor strandsuppleties. Er dient wel rekening mee te worden gehouden dat het beoogde effect van een dergelijke suppletie pas na een aantal jaar zichtbaar wordt. Er moet dus ruim voordat de kustlijn landwaarts van de basiskustlijn komt te liggen, worden ingegrepen. Door goed in te spelen op de verwachte ontwikkeling van de kustlijn is het zeer goed mogelijk het handhavingsbeleid door middel van vooroeversuppleties uit te voeren.

Bij suppleren op 7 m diepte is de effectiviteit 25 %. De hoeveelheden die berekend zijn in hoofdstuk 4 moeten dan dus vermenigvuldigd worden met een faktor 4. Bij strandsuppleties is de effectiviteit ongeveer 80 % (zie figuur 5.1). Hier hoort dus een vermenigvuldigingsfaktor van 1,25 bij. Bij suppleren op 7 m diepte is dus 3,2 keer zoveel suppletiemateriaal nodig als bij een strandsuppletie. Eén en ander geldt echter voor min of meer "normale" suppleties die bedoeld zijn om de verliezen van structureel eroderende kusten te compenseren. Bij suppleties die bedoeld zijn om de zeespiegelstijging "bij te houden", moet vroeg of laat ook de vooroever worden opgehoogd. Er moeten in dat verband dus geheel andere effectiviteits-definities worden gebruikt.

Het genoemde onderzoek van het Waterloopkundig Laboratorium dat in Technisch Rapport 14 is gerapporteerd, geldt alleen voor de Hollandse kust. De processen bij de kusten van de Waddeneilanden en de Zeeuwse delta verschillen van de processen bij de Hollandse kust. De processen bij de Hollandse kust worden gedomineerd door golven; bij de Waddeneilanden en de Zeeuwse Delta door getijstromen. De genoemde effectiviteitspercentages zijn wellicht niet algemeen geldig voor de Nederlandse kust.

5.3 Strandsuppleties

Zoals aangegeven in paragraaf 5.2.1 is de effectiviteit van strandsuppleties ongeveer 80 %. Dit is dus een voordeel ten opzichte van de vooroeversuppleties. Een ander voordeel van strandsuppleties is dat het effect direct zichtbaar is. De kustlijn kan op deze manier eenvoudig worden gehandhaafd.

5.3.1 Uitgestelde aanleg

Aangezien er nog onduidelijkheid heerst over de vraag tot welke dieptelijn het kustprofiel bij zeespiegelstijging moet worden opgehoogd, zou het aantrekkelijk zijn om een afwachtende houding aan te nemen wat betreft het suppleren van de hoeveelheden zoals die in hoofdstuk 4 zijn berekend. Er zou dan voor kunnen worden gekozen om de kustlijn wel systematisch op zijn plaats te houden maar het gehele profiel dan nog niet op te hogen. Er kan aldus

precies worden ingespeeld op de werkelijk optredende zeespiegelstijging en de daarbij benodigde volumina voor zandophoging van het diepere profielgedeelte. Er is dan sprake van uitgestelde aanleg. De hierbij ontstane situatie is geschetst in figuur 5.2. Het probleem hierbij is dat de veiligheid misschien niet steeds gehandhaafd blijft. In hoofdstuk 6 zal hier verder op worden ingegaan.

5.4 De beschikbaarheid van de benodigde hoeveelheden zand

Bij de uitvoering van zandsuppleties werd in het verleden vaak gebruik gemaakt van zand dat gewonnen werd bij uitvoering van baggerwerken bijvoorbeeld ten behoeve van vaargeulonderhoud. Omdat dit sediment soms met rivierslib is vervuild, is dat materiaal niet zonder meer geschikt voor kustonderhoud. Steeds vaker wordt zand dan ook gewonnen op dieper water. De Noordzeebodem lijkt een "onuitputbare" winput. Ter indicatie: uit een wingebied van $10 \times 10 \text{ km}^2$ kan door een put van 1 m diepte te baggeren $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ zand worden gewonnen. Wel moet rekening worden gehouden met de ecologische gevolgen voor de bodemcultuur (Handboek zandsuppleties, RWS, 1988, zie ook hoofdstuk 3 Basisrapport kustnota 1995, De Ruig, 1995).

Omdat zand winnen op dieper water vaak kostbaar is door de langere vaarafstand is in Technisch Rapport 10 onderzocht of het mogelijk is zand dichterbij de kust te winnen, zonder dat dit gevolgen heeft voor de kustontwikkeling. Uit deze studie is gebleken dat zandwinning buiten de NAP -14 m nauwelijks nadelige gevolgen heeft voor de kust mits de winput niet te diep wordt gemaakt.

6 De veiligheid van de duinen als waterkering

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal worden nagegaan wat mogelijke klimaatveranderingen voor gevolgen hebben voor de Nederlandse kust. Hierbij zal worden uitgegaan van het feit dat het handhavingsbeleid consequent wordt uitgevoerd. Met andere woorden: de kust wordt opgehoogd om de zeespiegelstijging te volgen. Wanneer dit het geval is en alleen zeespiegelstijging wordt beschouwd dan verandert er, behalve dat de relatieve duinhoogte afneemt, nagenoeg niets aan de situatie. De veiligheid blijft gehandhaafd. Alleen wanneer sprake is van uitgestelde aanleg (zie hoofdstuk 3) zou de veiligheid in het geding kunnen komen. Eventuele klimaatveranderingen kunnen echter ook tot gevolg hebben dat het golfklimaat verandert. Dit heeft vervolgens weer gevolgen voor de veiligheid. In het vervolg van deze studie wordt de veiligheid stapsgewijs voor de eerder genoemde scenario's behandeld.

6.2 De huidige toestand van de Nederlandse kust

De veiligheid van de Nederlandse duinen wordt momenteel getoetst volgens de procedures beschreven in de TAW-leidraad voor beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering. In die leidraad speelt het DUROS-model (DUin eROSie) een centrale rol. In dit model wordt uitgegaan van een rekenpeil. Dit is een peil dat 2/3 deel van de decimeringshoogte boven het ontwerppeil ligt dat voor andere waterkeringen wordt gebruikt. Onder de huidige omstandigheden voldoet de Nederlandse kust aan de veiligheidsnormen. Om een vergelijkingscriterium te verkrijgen zijn eerst voor drie willekeurige dwarsprofielen duinafslagberekeningen gemaakt volgens het DUROS-model voor de huidige stormomstandigheden. Er zijn berekeningen gemaakt voor één dwarsprofiel van de Hollandse kust, voor één dwarsprofiel van de Zeeuwse kust en voor één dwarsprofiel van de Waddenkust.

6.3 Toetsing van de veiligheid bij alleen zeespiegelstijging

6.3.1 De Hollandse kust

Voor de Hollandse kust is een profiel gekozen uit het kustvak Rijnland. Dit profiel is geschetst in figuur 6.1. Voor de Hollandse kust geldt voor het ontwerppeil een overschrijdingsfrequentie voor de waterstand van 10^{-4} per jaar. Bij deze frequentie horen de ontwerpparameters ("Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen voor de periode 1995-2000", concept 1994 RIKZ/RIZA/DWW) zoals weergegeven in tabel 6.1. Als het profiel volgens deze parameters wordt getoetst met het DUROS-model dan treedt er een duinafslag op zoals geschetst in figuur 6.2. De duinafslag, die gegeven wordt in de uitvoer-file van het model is gelijk aan $x(d)-x(b)$ en bedraagt 49,5 m. De waarde $x(b)$ is de x -waarde van het snijpunt van het duinfront en het rekenpeil. Vervolgens wordt het profiel getoetst voor de jaren 2090 en 2190 waarbij er in eerste instantie alleen met zeespiegelstijging rekening zal

* In het vervolg zal dit rapport worden aangeduid als het "Randvoorwaarden-boek"

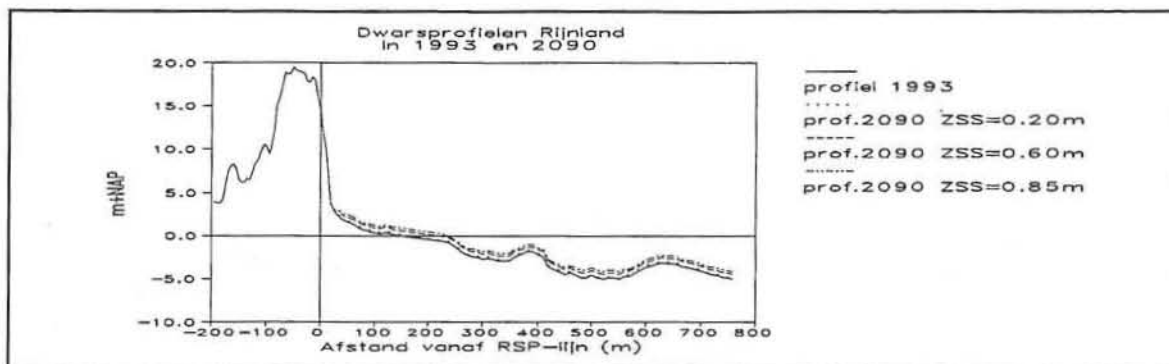


fig 6.1 Dwarsprofiel Rijnland

Ontwerppeil (m+NAP)	5,20
Decimeringshoogte (m)	0,85
Rekenpeil 2000 (m+NAP)	5,75
Significante golfhoogte op NAP-20m (m)	8,60
Bijbehorende golfperiode (s)	12,0
Rekenkorreldiameter (μm)	210

Tabel 6.1 Ontwerpparameters voor kustvak Rijnland

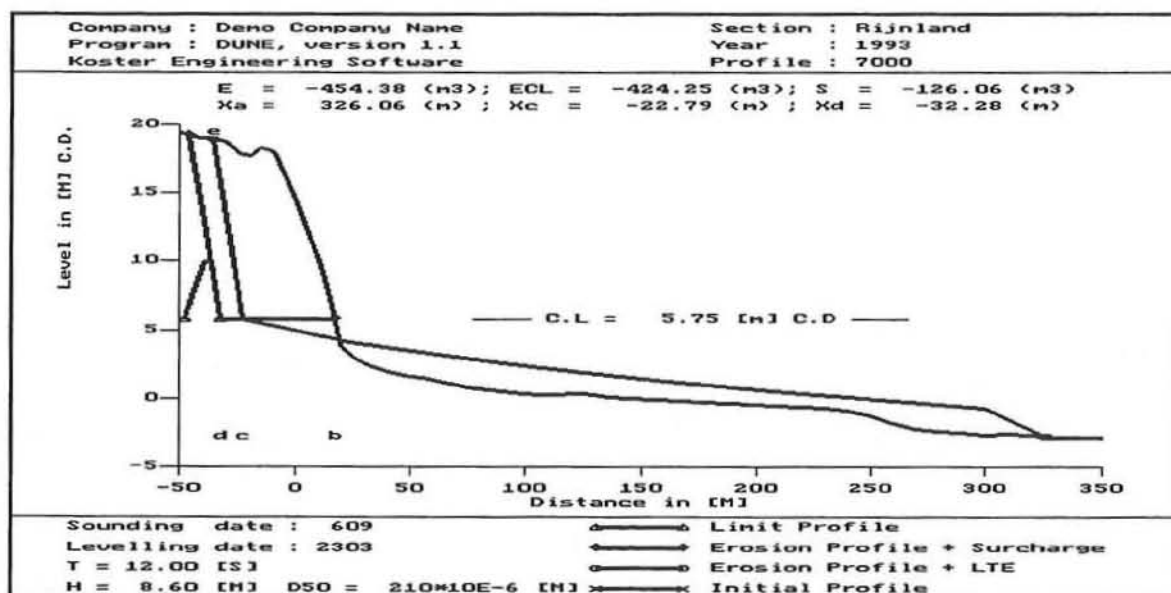


fig 6.2 Duinafslag volgens DUROS voor kustvak Rijnland

worden gehouden. Voor deze toetsing wordt dus alleen het ontwerppeil aangepast. Het ontwerppeil wordt voor het jaar 2090 respectievelijk met 0,20 m, 0,60 m en 0,85 m verhoogd. Voor het jaar 2190 worden deze getallen verdubbeld. Het dwarsprofiel wordt, in overeenstemming met deze getallen, opgehoogd. Voor het jaar 2090 ziet dat eruit zoals aangegeven in figuur 6.1. Wanneer in de praktijk de kustlijn gehandhaafd wordt door de hoeveelheden zand zoals berekend in hoofdstuk 4 op het strand te suppleren, dan kan er van worden uitgegaan dat het zand zich redelijk snel zeewaarts verspreidt. Het is echter minder aannemelijk dat het zand zich even snel over de duinen zal verspreiden. Voor de ophoging van het dwarsprofiel wordt aangenomen dat deze plaatsvindt vanaf de zeewaartse grens van het actieve dwarsprofiel tot aan de duinvoet die ongeveer op de NAP +3 m lijn ligt. Door middel van deze berekeningen zal worden nagegaan wat het effect is van deze gedeeltelijke ophoging van het dwarsprofiel op de mate van duinafslag. Wanneer overigens het gehele profiel zou worden opgehoogd (dus inclusief de duintoppen) verandert er vanzelfsprekend niets en blijft de mate van duinafslag gelijk.

De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in tabel 6.2. De duinafslag wordt gegeven als de verplaatsing van de duinvoet ten opzichte van $x(b)_{1990}$. Figuur 6.5 laat de output-figures van het DUROS-model zien. De resultaten uit tabel 6.2 zijn ook weergegeven in figuur 6.3. De toename van de duinafslag ten opzichte van de huidige situatie bedraagt in het jaar 2190 in het ongunstige scenario bijna 15 procent. In figuur 6.4 zijn de percentages uitgezet ten opzichte van de zeespiegelstijging.

6.3.2 De Zeeuwse kust

Voor de Zeeuwse kust is een profiel gekozen uit het kustvak Schouwen. Dit profiel is geschetst in figuur 6.6. Voor ontwerpduinafslagberekeningen in Zeeland moet met een overschrijdingsfrequentie voor de waterstand van $2,5 \cdot 10^{-4}$ per jaar rekening worden gehouden. De bijbehorende ontwerpparameters volgens het Randvoorwaarden-boek zijn in tabel 6.3 weergegeven. Toetsing van het gekozen profiel aan de bovenstaande parameters levert een duinafslag van 51,2 m. Dit is geschetst in figuur 6.7. In deze figuur is te zien dat het profiel landwaarts kunstmatig is verhoogd. Dit is gedaan om in het vervolg een goed beeld te kunnen krijgen van de toename van de duinafslag. Wanneer het profiel vervolgens voor de jaren 2090 en 2190 wordt getoetst voor alleen zeespiegelstijging, dan leidt dat tot de resultaten zoals aangegeven in tabel 6.4. De percentages voor de toename van de duinafslag liggen voor dit kustvak een stuk hoger dan voor het kustvak Rijnland. Dit komt doordat de duintop hier laag is (nog geen 10 m boven NAP). De resultaten zijn uitgezet in twee verschillende grafieken zoals geschetst in de figuren 6.8 en 6.9. De toename ten opzichte van de huidige situatie in 2190 in het ongunstige scenario bedraagt bijna 40 procent.

6.3.3 De Waddenkust

Voor de Waddenkust is gekozen voor een profiel uit het kustvak Terschelling. Dit profiel is geschetst in figuur 6.10. Het profiel is gemeten voordat de vooroeversuppletie in 1993 werd uitgevoerd. Voor de Waddenkust wordt bij duinafslagberekeningen uitgegaan van een overschrijdingsfrequentie voor de waterstand van $5 \cdot 10^{-4}$ per jaar. De bijbehorende ontwerpparameters zijn vermeld in tabel 6.5. Toetsing van het dwarsprofiel met deze parameters geeft een duinafslag van 23,5 m. Het afslagprofiel is geschetst in figuur 6.11. Vervolgens wordt het profiel getoetst voor zeespiegelstijging in de jaren 2090 en 2190. De resultaten van deze berekeningen zijn in tabel 6.6 samengevat. In de figuren 6.12 en 6.13 zijn

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Procentuele toename
1990	0	5,75	8,60	12,00	49,5	0
2090	1	5,95	8,60	12,00	50,2	1,4
2090	2	6,35	8,60	12,00	51,6	4,2
2090	3	6,60	8,60	12,00	52,6	6,3
2190	1	6,15	8,60	12,00	50,9	2,8
2190	2	6,95	8,60	12,00	54,1	9,3
2190	3	7,45	8,60	12,00	56,8	14,7

Tabel 6.2 Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland

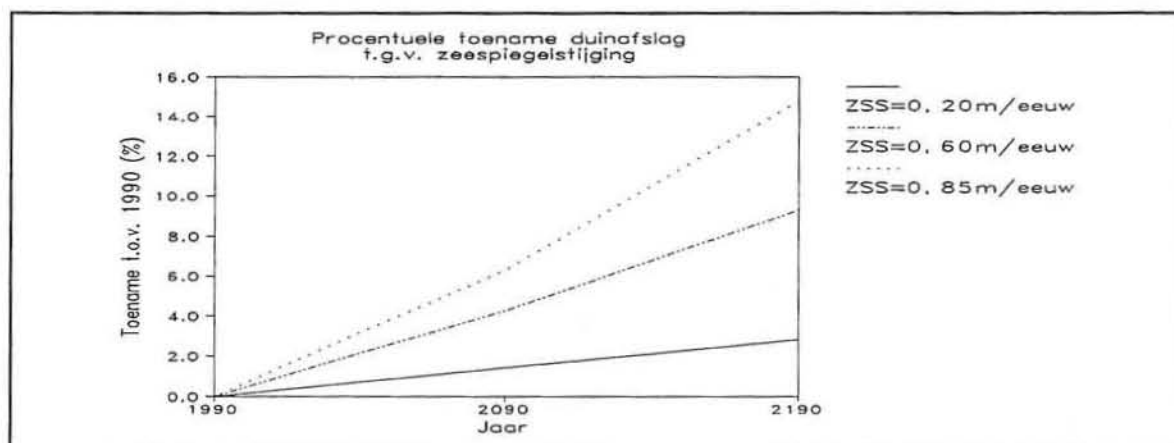


fig 6.3 Toename in duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Rijnland

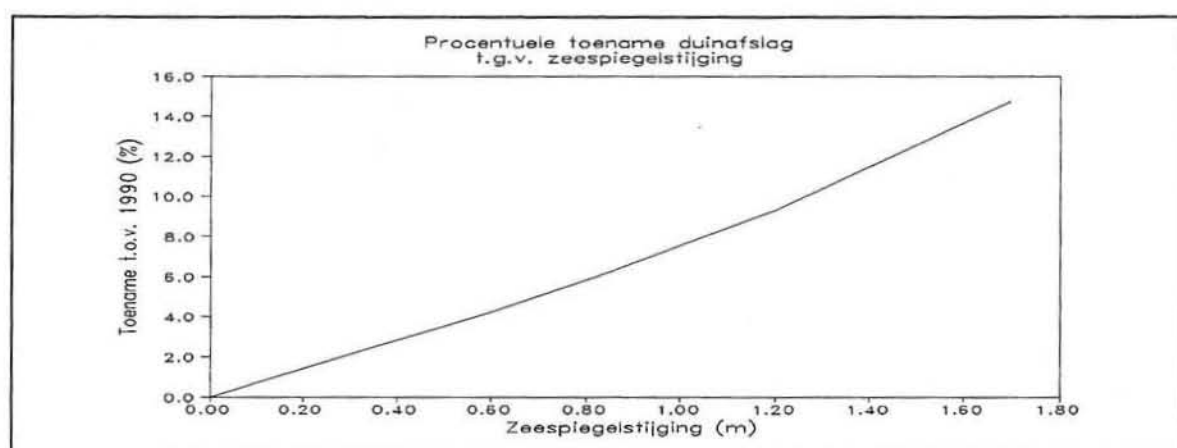


fig 6.4 Toename van duinafslag t.o.v. de zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland

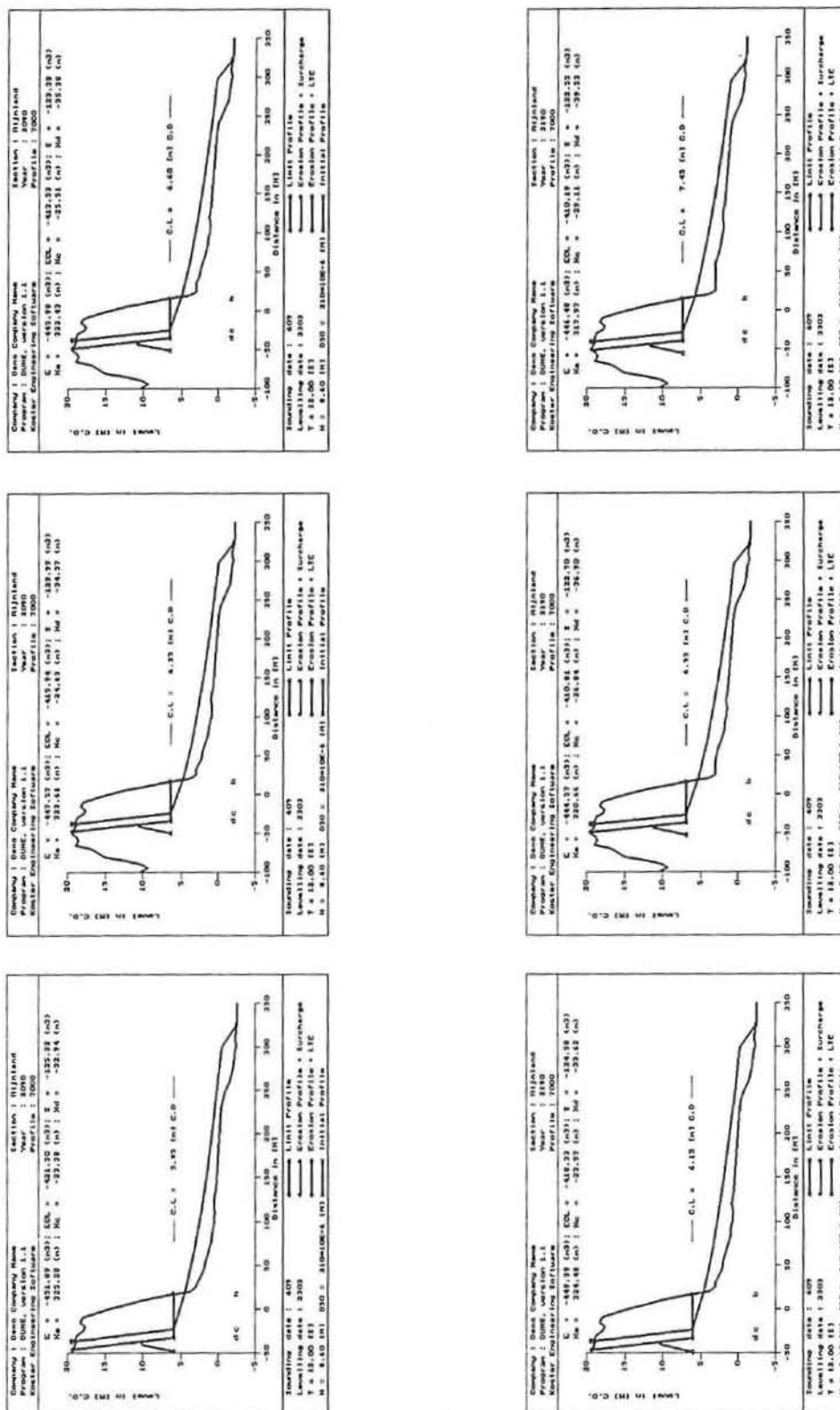


fig 6.5 Resultaten DUROS voor zeespiegelstijging

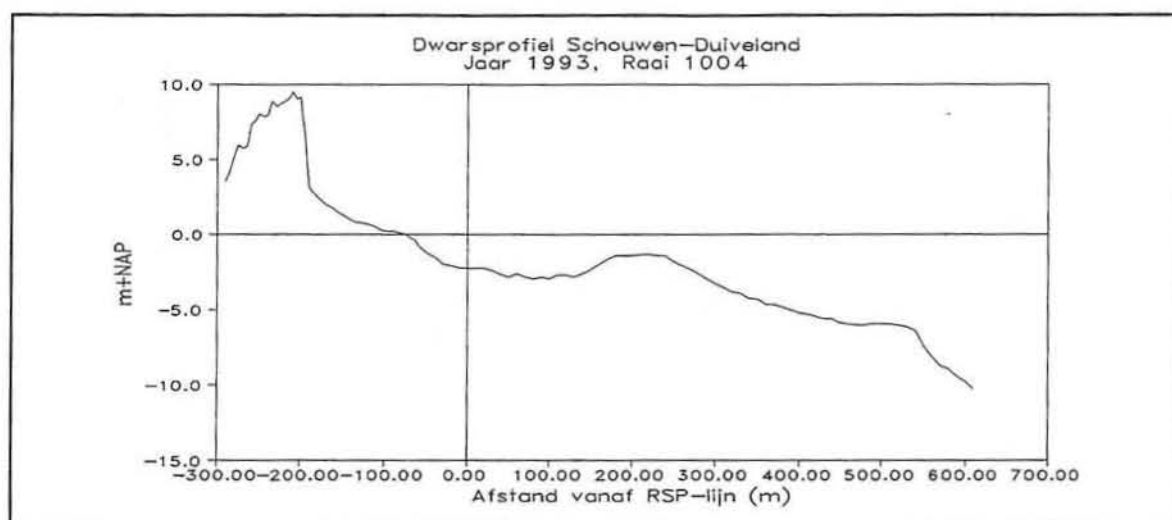


fig 6.6 Dwarsprofiel Schouwen-Duiveland

Ontwerppeil (m+NAP)	4,95
Decimeringshoogte (m)	0,68
Rekenpeil 2000 (m+NAP)	5,40
Significante golfhoogte (m)	4,15
Bijbehorende golfperiode (s)	8,00
Rekenkorreldiameter (μm)	209

Tabel 6.3 Ontwerpparameters voor Schouwen-Duiveland

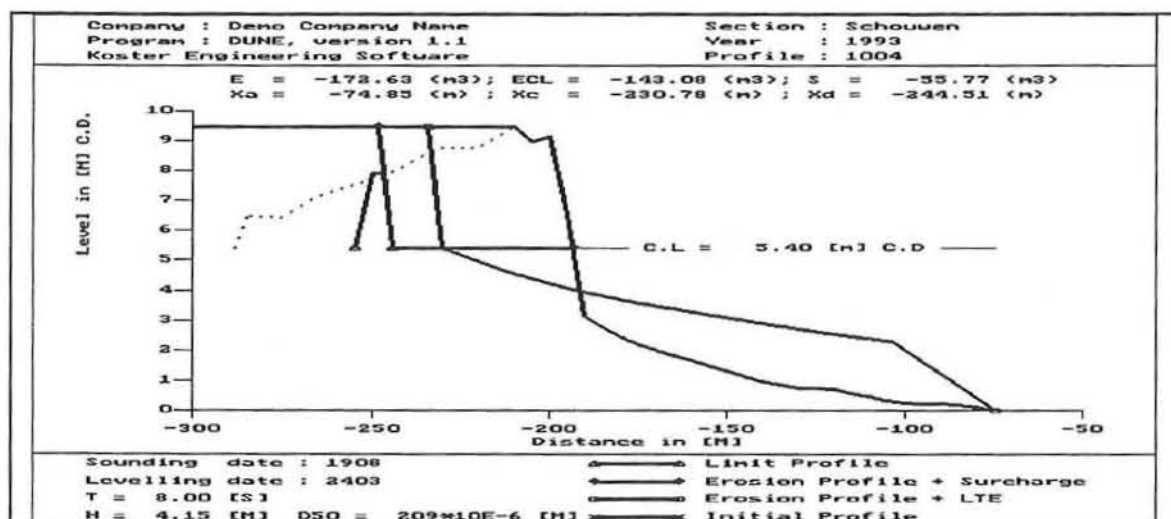


fig 6.7 Duinafslag volgens DUROS voor Schouwen-Duiveland

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Procentuele toename
1990	0	5,40	4,15	8,00	51,2	0
2090	1	5,60	4,15	8,00	52,7	2,9
2090	2	6,00	4,15	8,00	56,1	9,6
2090	3	6,25	4,15	8,00	58,7	14,7
2190	1	5,80	4,15	8,00	54,3	6,1
2190	2	6,60	4,15	8,00	63,1	23,2
2190	3	7,10	4,15	8,00	71,4	39,4

Tabel 6.4 Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen

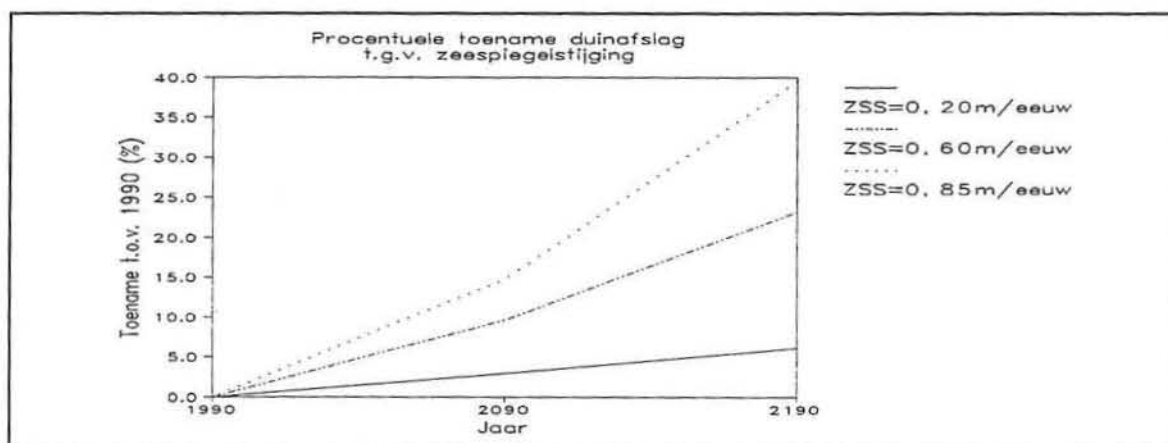


fig 6.8 Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Schouwen

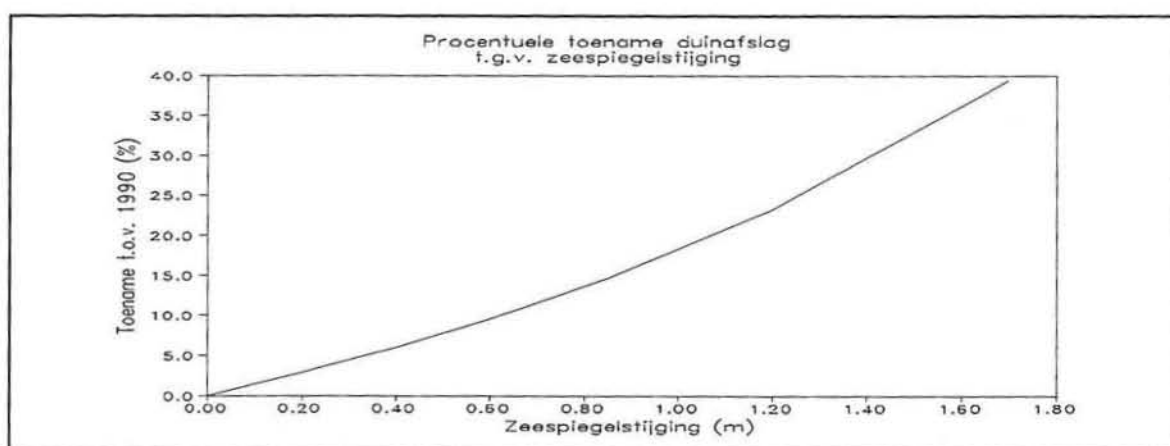


fig 6.9 Toename duinafslag t.o.v. zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen

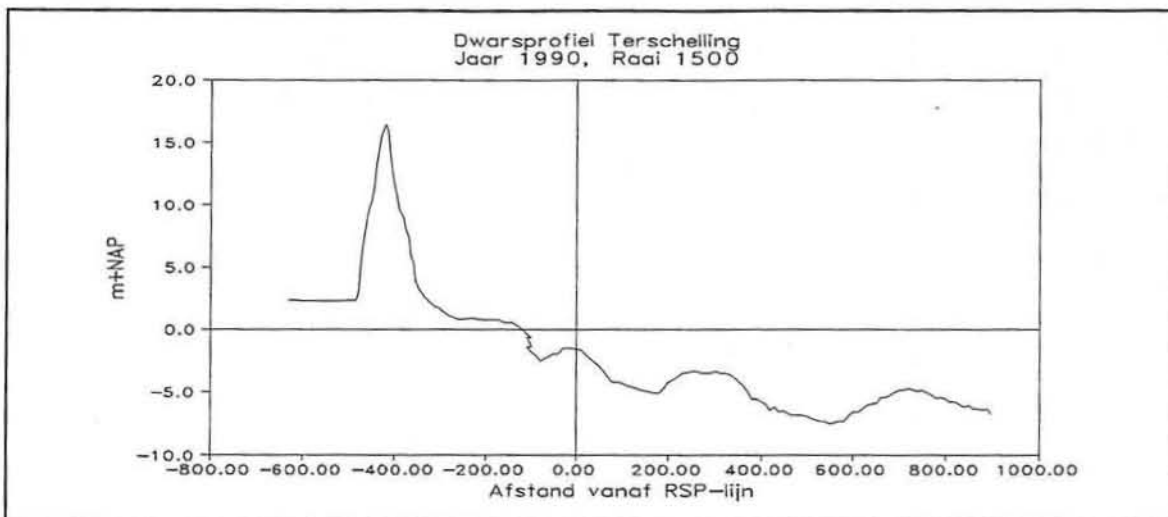


fig 6.10 Dwarsprofiel Terschelling

Ontwerppeil (m+NAP)	3,95
Decimeringshoogte (m)	0,23
Rekenpeil 2000 (m+NAP)	4,10
Significante golfhoogte (m)	9,00
Bijbehorende golfperiode (s)	12,00
Rekenkorreldiameter (μm)	179

Tabel 6.5 Ontwerpparameters Terschelling

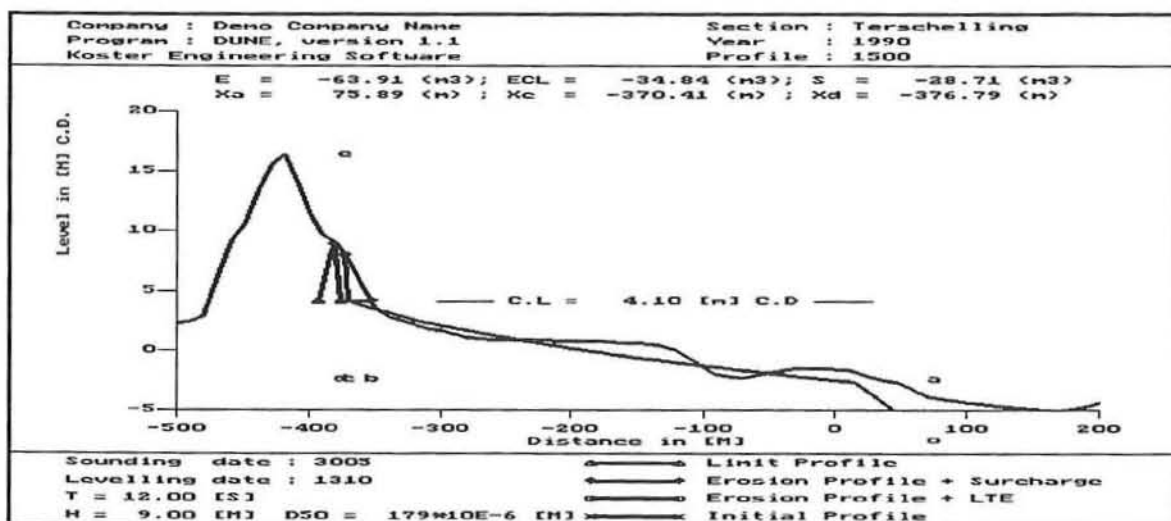


fig 6.11 Duinafslag volgens DUROS voor kustvak Terschelling

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}(m)$	Procentuele toename
1990	0	4,10	9,00	12,00	23,5	0
2090	1	4,30	9,00	12,00	24,5	4,1
2090	2	4,70	9,00	12,00	27,1	15,2
2090	3	4,95	9,00	12,00	29,2	24,2
2190	1	4,50	9,00	12,00	25,7	9,5
2190	2	5,30	9,00	12,00	32,8	39,5
2190	3	5,80	9,00	12,00	39,0	66,1

Tabel 6.6 Resultaten DUROS-berekening voor zeespiegelstijging in kustvak Terschelling

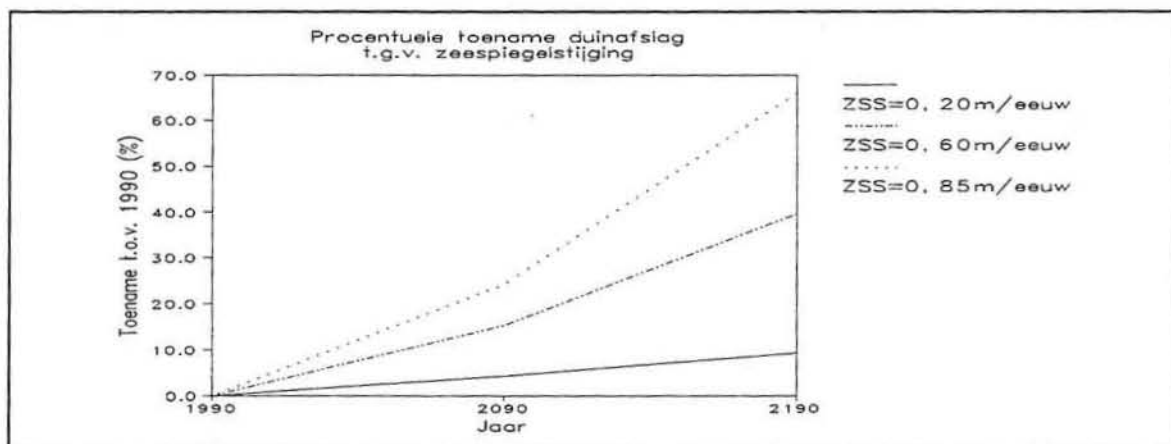


fig 6.12 Procentuele toename duinafslag in 2090 en 2190 voor kustvak Terschelling

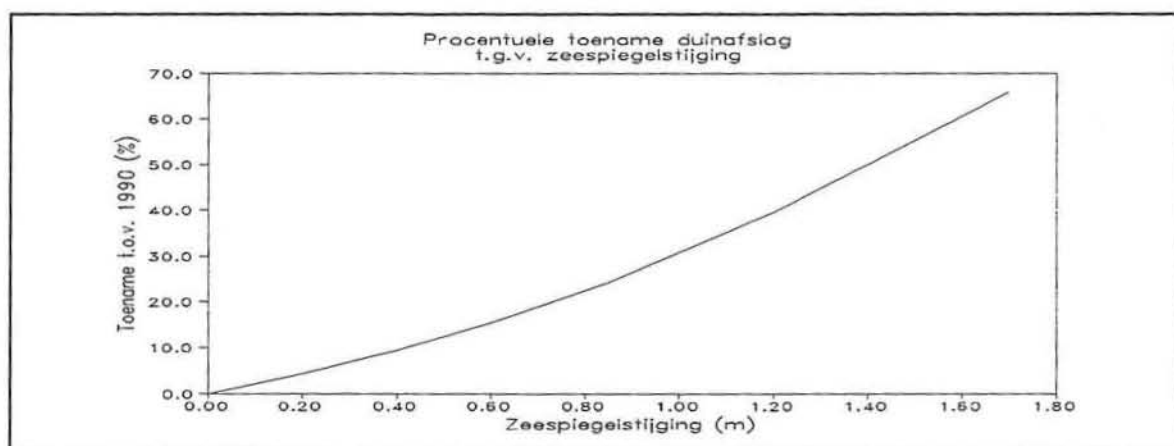


fig 6.13 Toename duinafslag t.o.v. zeespiegelstijging voor kustvak Terschelling

	1. Beleids Scenario	2. Anticiperend Scenario	3. Ongunstig Scenario
Zeespiegelstijging	+0,20m	+0,60m	+0,85m
Rekenpeil	+0,20m	+0,65m	+1,50m
Golfhoogte	+0%	+0%	+8%
Golfperiode	+0s	+0s	+1s

Tabel 6.7 De verschillende scenario's volgens de nota 'Kustverdediging na 1990' onder extreme omstandigheden.

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Procentuele Toename
1990	0	5,75	8,60	12,00	49,5	0
2090	1	5,95	8,60	12,00	50,2	1,4
2090	2	6,40	8,60	12,00	52,6	6,3
2090	3	7,25	9,29	13,00	70,0	41,4
2190	1	6,15	8,60	12,00	50,9	2,8
2190	2	7,05	8,60	12,00	56,2	13,5
2190	3	8,75	10,03	14,00	94,8	91,5

Tabel 6.8 Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Rijnland

de resultaten als grafieken weergegeven. De toename ten opzichte van de huidige situatie in 2190 in het ongunstige scenario bedraagt ruim 65 procent.

6.4 Toetsing van de veiligheid bij optreden van de verschillende scenario's

In deze paragraaf zullen de drie dwarsprofielen getoetst worden aan de scenario's die genoemd zijn in hoofdstuk 2. Voor de duidelijkheid worden de voor deze paragraaf van belang zijnde parameters (veranderingen per eeuw) van die scenario's nog eens samengevat in tabel 6.7. De rekenpeilen worden nu dus niet met de zeespiegelstijging verhoogd maar met de waarde zoals die in tabel 6.7 per scenario is gegeven. Voor de golfhoogte geldt in scenario 3 dat deze voor het jaar 2090 met 8 procent ten opzichte van de hoogte in 1990 wordt verhoogd. Voor het jaar 2190 wordt de golfhoogte nog eens met 8 procent (dus: 16,64 procent t.o.v. 1990) verhoogd. De golfperiode wordt in scenario 3 steeds met 1 s verhoogd.

6.4.1 De Hollandse kust

Het profiel uit het kustvak Rijnland is getoetst volgens de scenario's zoals gegeven in tabel 6.7. De resultaten zijn gegeven in tabel 6.8. De resultaten zijn ook grafisch weergegeven in figuur 6.14. In figuur 6.14 is te zien dat het grensprofiel in het jaar 2190 bij het ongunstige scenario buiten het aanwezige duin van de eerste duinregel valt. De toename in duinafslag is hierdoor relatief groot omdat het voor het afslagprofiel benodigde volume uit een geringere duinhoogte moet worden gehaald. Omdat het bij deze analyse voornamelijk gaat om enig inzicht in algemene verhoudingsgetallen te krijgen, wordt de toename van de duinafslag door een dergelijk effect niet representatief geacht. Daarom is het profiel landwaarts opgehoogd. De duintop is landwaarts op een constante hoogte doorgetrokken. Dit is weergegeven in figuur 6.15. De duinafslag is in dit geval inderdaad minder. De hoeveelheid erosie boven het ontwerppeil blijft wel nagenoeg gelijk (zie figuur 6.14). De gecorrigeerde waarde voor de duinafslag is opgenomen in tabel 6.8. De percentages uit tabel 6.8 zijn uitgezet in de grafiek in figuur 6.16. Het is opvallend dat in het geval van scenario 2 de percentages groter zijn ten opzichte van de situatie waar alleen zeespiegelstijging in rekening werd gebracht (tabel 6.2). Dit houdt in dat een extra verhoging van het rekenpeil, terwijl de bodem slechts de zeespiegelstijging volgt, een groot effect heeft op de toename van duinafslag. In het geval van scenario 3 is dit nog duidelijker. Naast het effect van het extra verhogen van het rekenpeil heeft ook de verhoging van de golfhoogte een groot effect op de toename van duinafslag.

Om inzicht te krijgen in de invloed van de verschillende parameters zijn aanvullende berekeningen gemaakt. Hierbij is uitgegaan van scenario 3 in het jaar 2190. De duinafslag wanneer alleen zeespiegelstijging in rekening wordt gebracht bedraagt 56,8 m (zie tabel 6.2). Het rekenpeil is dan 7,45 m. Als het rekenpeil extra verhoogd wordt tot 8,75 m dan bedraagt de duinafslag 86,6 m. Wordt daarbij de golfhoogte ook verhoogd (met 2*8 %) dan bedraagt de duinafslag 94,8 m. Deze waarden zijn weergegeven in tabel 6.9.

6.4.2 De Zeeuwse kust

Ook het gekozen profiel aan de Zeeuwse kust is getoetst aan de verschillende scenario's. De resultaten zijn vermeld in tabel 6.10. De percentages voor de toename van duinafslag zijn uitgezet in de grafiek in figuur 6.17.

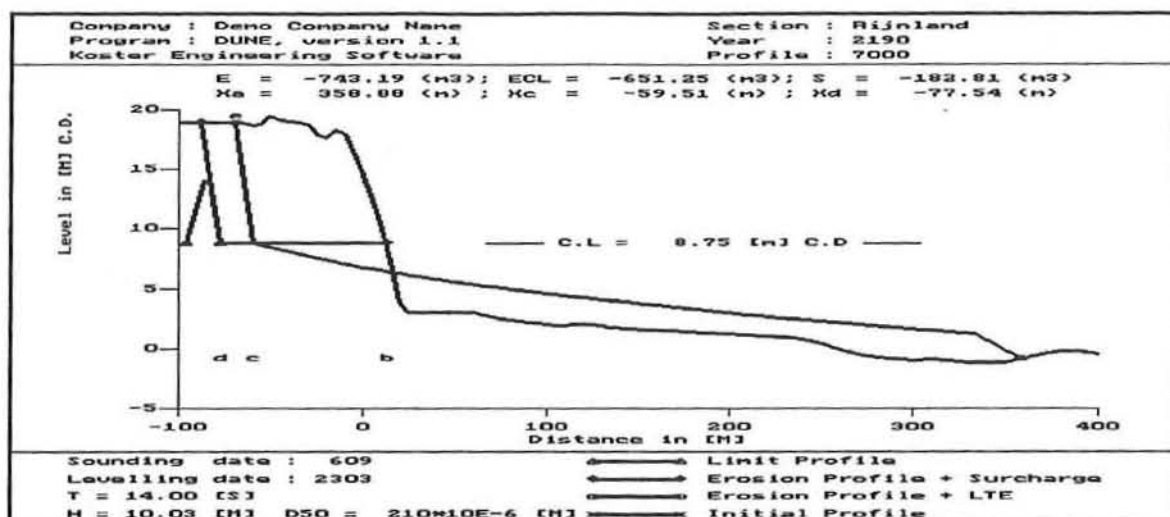


fig 6.15 Berekening met verlengd profiel kustvak Rijnland

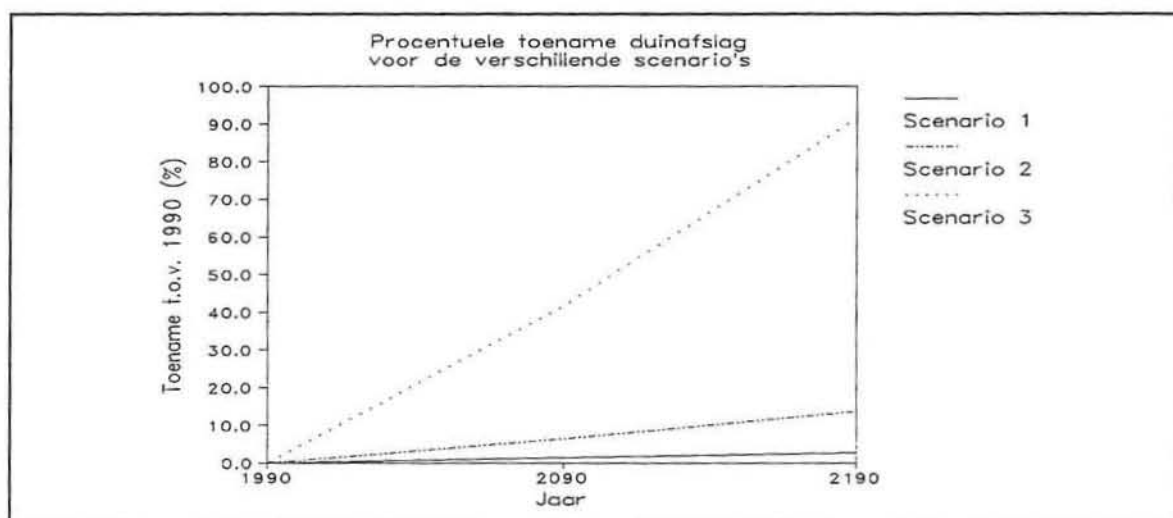


fig 6.16 Toename duinafslag in 2090 en 2190 kustvak Rijnland

Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Toename (%)
7,45	8,60	12,00	56,8	0
8,75	8,60	12,00	86,6	52,5
8,75	10,03	13,00	94,8	67,0

Tabel 6.9 Duinafslaganalyse t.o.v. het geval met alleen zeespiegelstijging (1,70m) in 2190

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverplaatsing t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Procentuele Toename
1990	0	5,40	4,15	8,00	51,2	0
2090	1	5,60	4,15	8,00	52,7	2,9
2090	2	6,05	4,15	8,00	57,3	11,9
2090	3	6,90	4,48	9,00	79,0	54,3
2190	1	5,80	4,15	8,00	54,3	6,1
2190	2	6,70	4,15	8,00	65,7	28,5
2190	3	8,40	4,84	10,0	126,0	145,9

Tabel 6.10 Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Schouwen-Duiveland

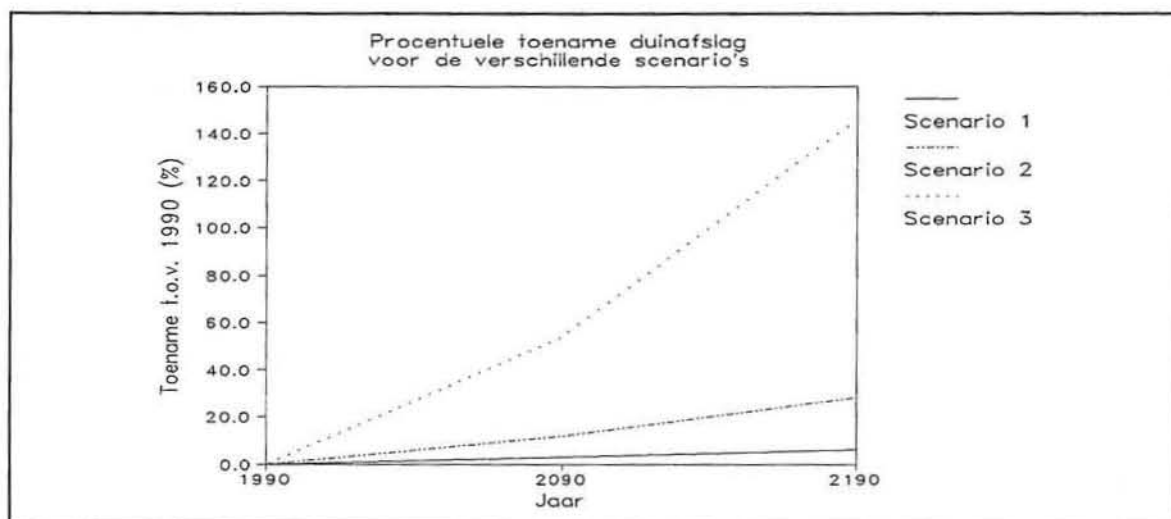


fig 6.17 Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor Schouwen-Duiveland

Jaar	Scenario	Rekenpeil (m+NAP)	H (m)	T (s)	Duinvoetverpl. t.o.v. $x(b)_{1990}$ (m)	Procentuele Toename
1990	0	4,10	9,00	12,00	23,5	0
2090	1	4,30	9,00	12,00	24,5	4,1
2090	2	4,75	9,00	12,00	28,1	19,5
2090	3	5,60	9,72	13,00	42,0	78,9
2190	1	4,50	9,00	12,00	25,7	9,5
2190	2	5,40	9,00	12,00	37,8	60,8
2190	3	7,10	10,50	14,00	63,7	170,9

Tabel 6.11 Resultaten voor de verschillende scenario's kustvak Terschelling

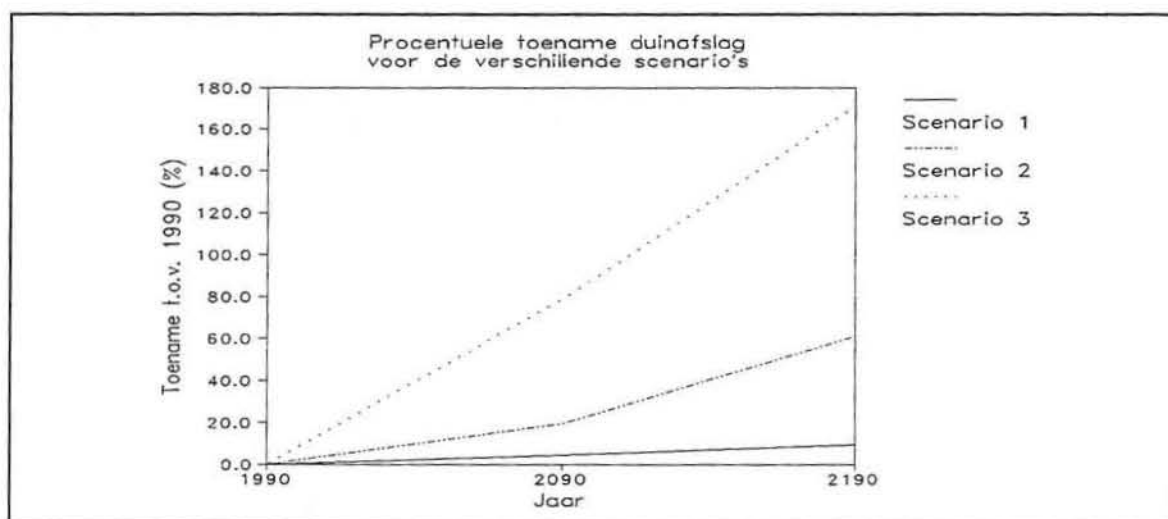


fig 6.18 Toename duinafslag in 2090 en 2190 voor Terschelling

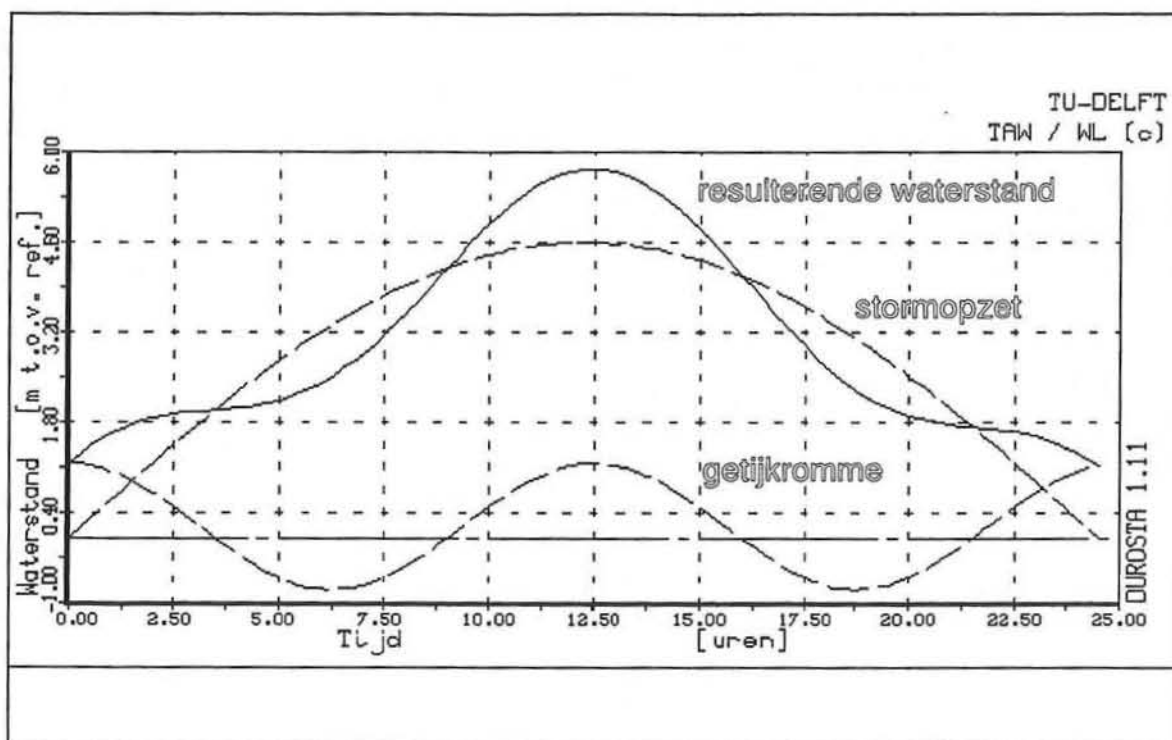


fig 6.19 Voorbeeld van invoer voor de waterstand in DUROSTA

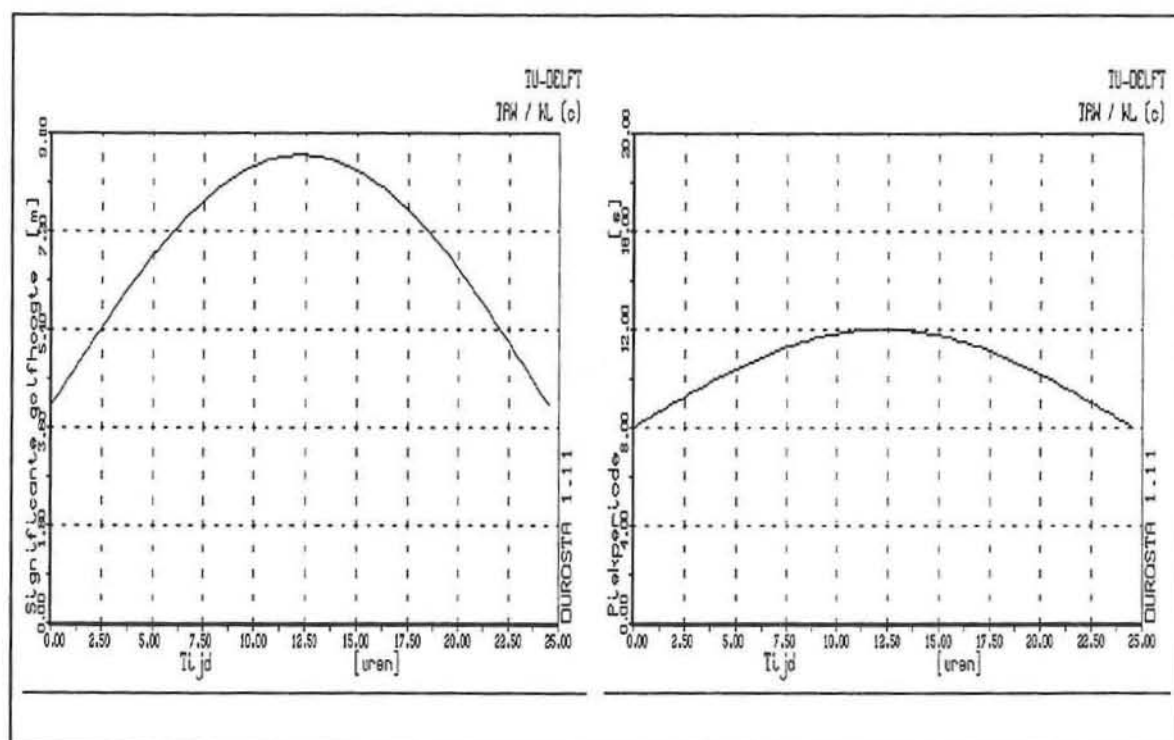


fig 6.20 Voorbeeld van invoer voor golfhoogte en -periode in DUROSTA

6.4.3 De Waddenkust

Ook voor het kustvak Terschelling zijn de berekeningen met het DUROS-model uitgevoerd. De resultaten worden gepresenteerd in tabel 6.11 en figuur 6.18.

De resultaten van paragraaf 6.4 worden in paragraaf 6.6 verder besproken.

6.5 Toetsing van de veiligheid bij uitgestelde aanleg

In hoofdstuk 4 is bepaald hoeveel zand er nodig is om het kustprofiel op te hogen tot een bepaalde dieptelijn. Het is niet duidelijk tot welke dieptelijn deze ophoging werkelijk nodig is. Daarom zou er voor kunnen worden gekozen om slechts ter plaatse van de waterlijn beperkte suppleties uit te voeren. De kustlijn wordt op die manier conform het kustbeleid op zijn plaats gehouden. Ook de keuze tot welke dieptelijn moet worden opgehoogd, wordt zo omzeild. Deze manier van kustlijnhandhaving kan gevolgen hebben voor de mate van duinafslag. Op de vooroever is dan immers sprake van uitgestelde aanleg. De golven zullen hierdoor met minder energieverlies de kust naderen. In deze paragraaf worden de resultaten van het onderzoek naar deze gevolgen uitgewerkt. Er is voor dit onderzoek weer naar de drie al eerder genoemde kustvakken gekeken. Voor deze analyse zijn dezelfde dwarsprofielen gebruikt. Alleen zijn ze nu niet geheel opgehoogd maar slechts vanaf de duinvoet (NAP +3 m lijn) tot de NAP -3 m lijn. Deze dieptelijn is aangenomen omdat wanneer er zand nabij de waterlijn wordt gesuppleerd er vanuit mag worden gegaan dat dat zand in ieder geval tot deze dieptelijn wordt verspreid.

Zoals eerder is vermeld, wordt voor de toetsing van de veiligheid van de duinen de TAW-leidraad gebruikt. In die leidraad staat het DUROS-model centraal. Het DUROS-model leent zich niet voor een analyse naar de gevolgen van een diepere vooroever op de mate van duinafslag. Volgens het DUROS-model treden er alleen veranderingen in de duinafslag op als het nog niet opgehoogde deel van het dwarsprofiel deel uitmaakt van het afslagprofiel. En ook dan komt het alleen door het aanpassen van de zandbalans dat de duinafslag verandert. Dit heeft niets te maken met het dieper zijn van de vooroever waardoor de golfhoogte dicht bij de kust eventueel hoger zou kunnen zijn dan in de situatie met het volledig opgehoogde dwarsprofiel. Ondanks dit zijn er toch berekeningen met DUROS-model gemaakt. Het is daarbij inderdaad gebleken dat bij alle drie de profielen het afslagprofiel niet in het invloedsgebied van de uitgestelde aanleg viel. Volgens het DUROS-model verandert er dus voor geen van de profielen iets aan de mate van duinafslag.

Het DUROSTA-model

Om toch een idee te krijgen van het effect van uitgestelde aanleg is gebruik gemaakt van het DUROSTA-model (Steetzel, 1993). De laatste twee letters van deze afkorting (TA) staan voor TijdAfhankelijk. Dit model is ontwikkeld omdat in de praktijk is gebleken dat het bij een aantal gevallen noodzakelijk was om inzicht te krijgen in de afslag als functie van de tijd. Het nieuwe model is grotendeels gebaseerd op dezelfde modelproeven als het DUROS-model, maar heeft een compleet andere beschrijving van het proces. In het DUROSTA-model wordt het zandtransport tijdens het duinafslagproces beschreven als een functie van de ter plaatse optredende waterbeweging. Omdat het model een andere fysische opbouw heeft komen de uitkomsten van DUROSTA niet altijd overeen met de uitkomsten van DUROS. Het model

Jaar	ZSS	Rekenpeil	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	5,95	225,1	231,6	2,9
	0,60	6,35	211,4	229,2	8,4
	0,85	6,60	217,7	249,2	14,4
2190	0,40	6,15	209,4	226,1	8,0
	1,20	6,95	202,5	233,9	15,5
	1,70	7,45	172,9	199,9	15,7

Tabel 6.12 Toename erosie t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland

Jaar	ZSS	Rekenpeil	H	T	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m)	(s)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	5,95	8,60	12,00	225,1	231,7	2,9
	0,60	6,40	8,60	12,00	222,5	241,1	8,4
	0,85	7,25	9,29	13,00	315,0	350,0	11,1
2190	0,40	6,15	8,60	12,00	209,4	226,1	8,0
	1,20	7,05	8,60	12,00	216,4	251,8	16,4
	1,70	8,75	10,03	14,00	334,3	363,2	8,6

Tabel 6.13 Toename erosie t.g.v. uitgestelde aanleg volgens verschillende scenario's voor kustvak Rijnland

reken niet met een constante waterspiegel; de gehele optredende getijbeweging met daarbij een stormopzet kan worden ingevoerd. In het DUROSTA model heeft de vorm van de vooroever wel invloed op de berekende mate van duinafslag. Ook de golfperiode wordt in dit model meegenomen. Ter illustratie wordt een voorbeeld gegeven van de invoer voor het DUROSTA-model. Randvoorwaarden voor de waterstand, golfhoogte en -periode worden ingevoerd op de zeewaartse grens van het beschouwde dwarsprofiel. Voor het kustvak Rijnland worden de ontwerpparameters gebruikt zoals gegeven in tabel 6.1. De maximale waterstand ten gevolge van het normale getij plus de maximale waarde van de stormopzet zijn samen gelijk aan de waarde voor het rekenpeil (NAP + 5,75 m). De manier waarop dit is ingevoerd, is weergegeven in figuur 6.19.

Het is aannemelijk dat de golfhoogte en -periode maximaal zijn op het tijdstip dat de maximale waterstand wordt bereikt. Derhalve worden de golfhoogte en -periode ingevoerd als weergegeven in figuur 6.20.

Tijdens de rekensessies met het DUROSTA-model is gebleken dat na het maximum van de storm de profielen weer worden opgebouwd. De duinafslag neemt dan nauwelijks nog toe. De berekeningen zijn op ongeveer een uur na het maximum van de storm afgebroken zodat een goed beeld wordt verkregen van de maximale afslag. Bij de rekensessies is gerekend met de hoeveelheid zand die van het duin wordt afgeslagen boven het geldende rekenpeil. Deze waarden behoren tot de standaard uitvoer van het DUROSTA-model. Om de duinafslag in strekkende meters te verkrijgen zijn aanvullende manipulaties nodig. Omdat het hier gaat om inzicht te krijgen in de effecten van uitgestelde aanleg en niet om een vergelijking tussen DUROS en DUROSTA te maken, zijn deze manipulaties niet gedaan. Uit de resultaten is gebleken dat het effect van uitgestelde aanleg toch maar klein is (maximaal 16 procent extra afslag). Mede hierom wordt er verder vanaf gezien om een omrekening naar strekkende meters uit te voeren.

In de volgende paragrafen zullen de resultaten van de berekeningen met uitgestelde aanleg per kustvak worden behandeld. Eerst zal weer nagegaan worden wat er gebeurt als alleen zeespiegelstijging in beschouwing wordt genomen. Daarna worden de verschillende scenario's behandeld.

6.5.1 De Hollandse kust

Wanneer alleen zeespiegelstijging wordt beschouwd, worden met DUROSTA voor het dwarsprofiel uit het kustvak Rijnland de getallen zoals gegeven in tabel 6.12 berekend. In deze tabel zijn eerst de hoeveelheden erosie boven het rekenpeil gegeven die berekend zijn voor het geval dat de dwarsprofielen geheel zijn opgehoogd. In de kolom daarnaast staan de getallen behorend bij het geval van uitgestelde aanleg, dus in het geval van gedeeltelijk opgehoogde profielen. Uit deze tabel blijkt dat de relatieve toename van de duinafslag bij uitgestelde aanleg ten opzichte van de situatie met een geheel opgehoogd profiel bijna 16 procent is bij het ongunstige scenario.

Overigens lijkt het vreemd dat de hoeveelheden erosie soms afnemen bij een toenemend rekenpeil. Dit betekent echter niet dat de duinafslag uitgedrukt in meters teruggang ook afneemt. De afstand vanaf het niveau van het rekenpeil tot aan de duintop neemt namelijk af als het rekenpeil toeneemt. Hierdoor neemt het volume van de afslag af maar neemt de teruggang van de duinvoet wel toe. De toename van de hoeveelheid erosie boven het rekenpeil is evenredig met de toename van de teruggang van het duin. De resulterende percentages

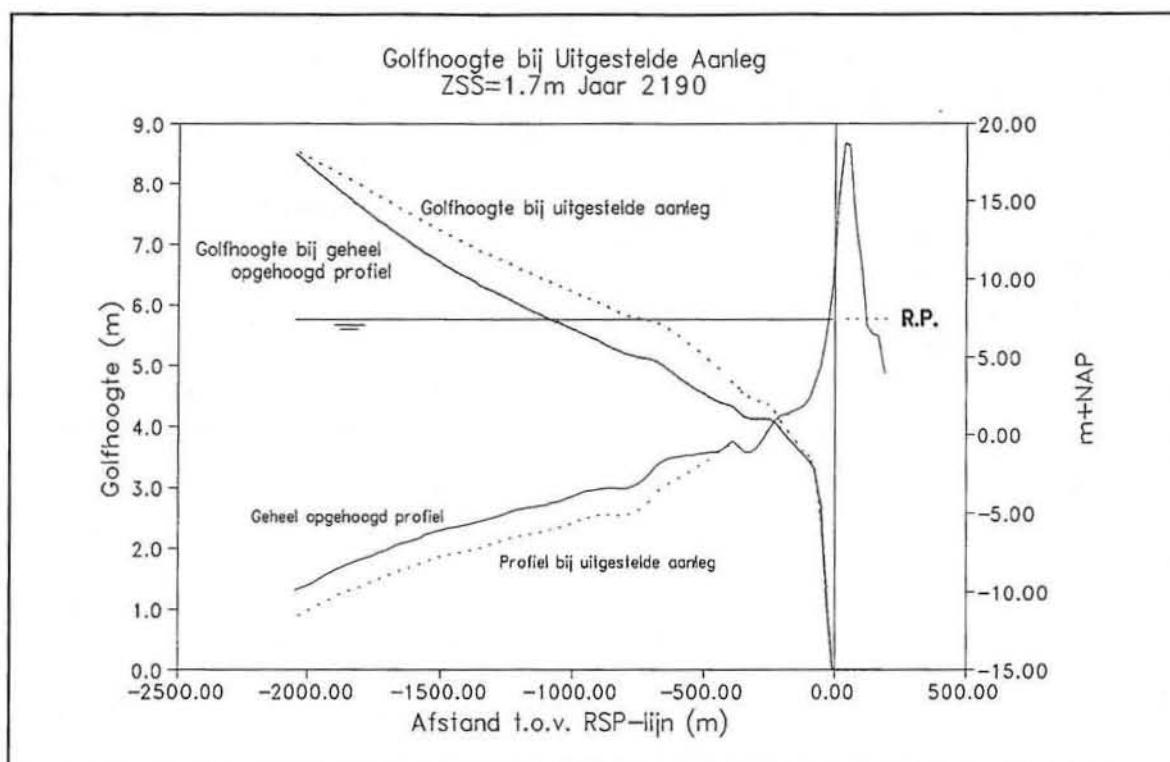


fig 6.21 Golfhoogte bij uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Rijnland

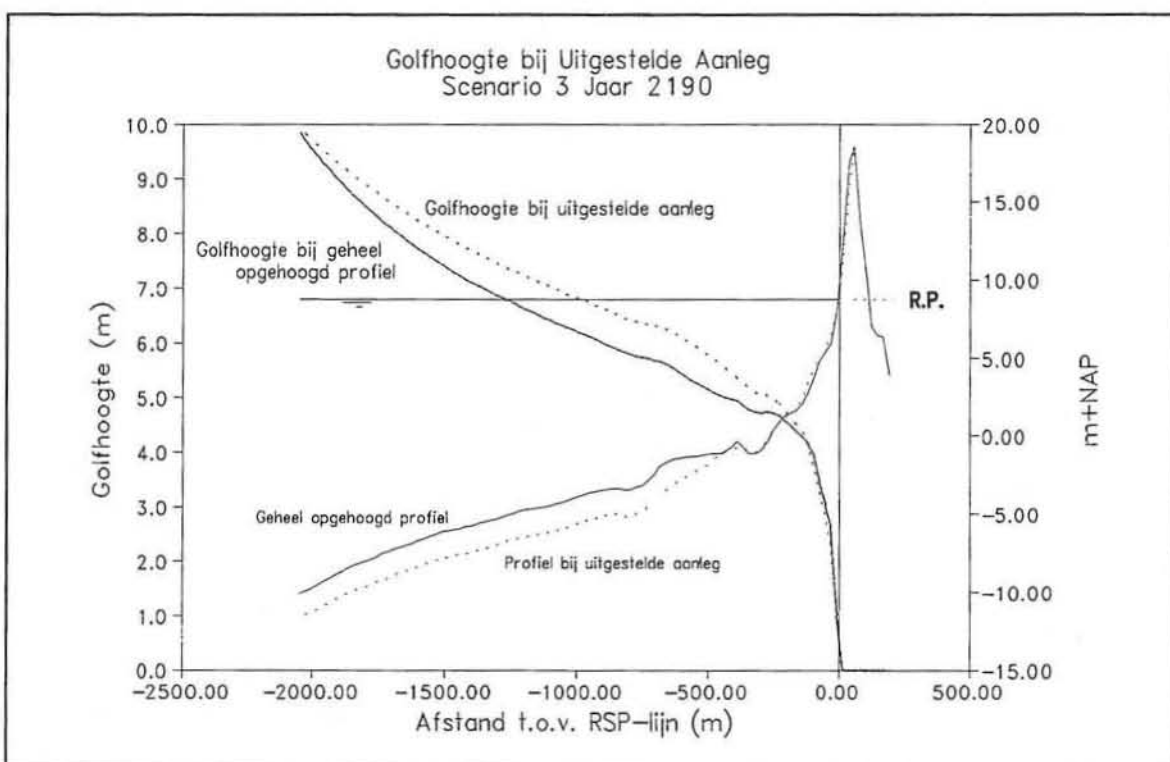


fig 6.22 Golfhoogte bij uitgestelde aanleg volgens scenario 3 voor kustvak Rijnland

Jaar	ZSS	Rekenpeil	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	5,60	90,9	90,9	0,0
	0,60	6,00	90,2	90,2	0,0
	0,85	6,25	85,0	85,2	0,3
2190	0,40	5,80	87,2	87,2	0,0
	1,20	6,60	85,1	85,3	0,2
	1,70	7,10	93,9	96,3	2,6

Tabel 6.14 Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Schouwen

Jaar	ZSS	Rekenpeil	H	T	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m)	(s)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	5,60	4,15	8,00	90,9	90,9	0,0
	0,60	6,05	4,15	8,00	85,1	85,3	0,2
	0,85	6,90	4,48	9,00	93,9	96,3	2,6
2190	0,40	5,80	4,15	8,00	87,2	87,2	0,0
	1,20	6,70	4,15	8,00	80,2	81,6	1,7
	1,70	8,40	4,84	10,00	64,4	69,9	8,5

Tabel 6.15 Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij verschillende scenario's voor kustvak Schouwen

Jaar	ZSS	Rekenpeil	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	4,30	47,2	47,4	0,6
	0,60	4,70	48,0	48,3	0,6
	0,85	4,95	48,7	50,0	2,5
2190	0,40	4,50	50,5	50,8	0,6
	1,20	5,30	53,3	54,5	2,3
	1,70	5,80	62,2	64,2	3,3

Tabel 6.16 Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij alleen zeespiegelstijging voor kustvak Terschelling

Jaar	ZSS	Rekenpeil	H	T	Erosie boven rekenpeil bij geheel opgehoogd profiel	Erosie boven rekenpeil bij uitgestelde aanleg	Procentuele toename
	(m)	(m+NAP)	(m)	(s)	(m3/m)	(m3/m)	(%)
2090	0,20	4,30	9,00	12,00	47,2	47,4	0,6
	0,60	4,75	9,00	12,00	50,5	51,2	1,3
	0,85	5,60	9,72	13,00	80,6	81,3	0,9
2190	0,40	4,50	9,00	12,00	50,5	50,8	0,6
	1,20	5,40	9,00	12,00	56,3	58,2	3,4
	1,70	7,10	10,50	14,00	133,4	135,0	1,2

Tabel 6.17 Toename duinafslag t.g.v. uitgestelde aanleg bij de verschillende scenario's voor kustvak Terschelling

kunnen dus ook voor de toename van duinafslag in strekkende meters worden gebruikt.

Vervolgens worden in tabel 6.13 de resultaten van de berekeningen met DUROSTA volgens de verschillende scenario's gepresenteerd. Opvallend is dat, wanneer de verschillende scenario's worden beschouwd, het relatieve verschil tussen de volumes die afslaan bij uitgestelde aanleg en die afslaan bij volledig opgehoogde profielen niet groter is dan wanneer alleen zeespiegelstijging in de beschouwing wordt betrokken. Absoluut liggen de waarden van de afslaghoeveelheden wel hoger. Om inzicht te krijgen in dit verschijnsel zijn in de figuren 6.21 en 6.22 de situaties geschetst voor scenario 3 in het jaar 2190. In figuur 6.21 staan de golfhoogtes die optreden, wanneer alleen zeespiegelstijging in acht wordt genomen, bij het geheel opgehoogde profiel respectievelijk het profiel bij uitgestelde aanleg. In figuur 6.22 staan de golfhoogtes voor scenario 3 in 2190 waarbij ook de extra verhoging van het stormvloedpeil en de toename van golfhoogte en -periode in rekening zijn gebracht. Waarschijnlijk is in figuur 6.22 het rekenpeil zo hoog dat de golven minder beïnvloed worden door de bodem dan in figuur 6.21 het geval is. Duidelijk is te zien dat uitgestelde aanleg inderdaad invloed heeft op de golfhoogte. Ook blijkt dat landwaarts van het punt waar de twee profielen weer samenvallen, de twee golfhoogteverlopen weer snel gelijk aan elkaar worden. De hogere golven breken zodat de golfhoogte snel afneemt.

6.5.2 De Zeeuwse kust

Voor het dwarsprofiel uit het kustvak Schouwen zijn de resultaten van de DUROSTA-berekeningen bij alleen zeespiegelstijging weergegeven in tabel 6.14. Wanneer de berekeningen worden gedaan voor de verschillende scenario's, dan worden de resultaten verkregen zoals gegeven in tabel 6.15. De duinafslag bij uitgestelde aanleg neemt ten opzichte van de situatie met een geheel opgehoogd profiel in het ongunstige scenario met 8,5 procent toe.

De maatgevende golfhoogte in dit gebied ligt lager dan in het kustvak Rijnland, vandaar dat de invloed van uitgestelde aanleg kleiner is.

6.5.3 De Wadden kust

Voor het dwarsprofiel uit het kustvak Terschelling staan de resultaten van de berekeningen bij alleen zeespiegelstijging in tabel 6.16. De resultaten van de berekeningen volgens de verschillende scenario's zijn weergegeven in tabel 6.17. De percentages voor de toename van de duinafslag ten gevolge van uitgestelde aanleg liggen voor dit dwarsprofiel ook lager dan voor het profiel uit het kustvak Rijnland (maximale toename 3,4 %). Dat komt waarschijnlijk door de lage waarde van het rekenpeil. Opvallend is dat de relatieve toename ten gevolge van uitgestelde aanleg bij scenario 3 in de jaren 2090 en 2190 lager is dan bij scenario 2. De absolute waarden voor de duinafslag liggen bij scenario 3 echter wel veel hoger dan bij scenario 2.

6.6 Discussie over de toename van duinafslag

In de voorafgaande paragrafen zijn voor drie verschillende profielen en verschillende situaties percentages uitgerekend voor de toename van duinafslag. Deze berekeningen gelden voor zeerepen die in principe zo breed zijn dat ook de extra afslag ten gevolge van veranderende

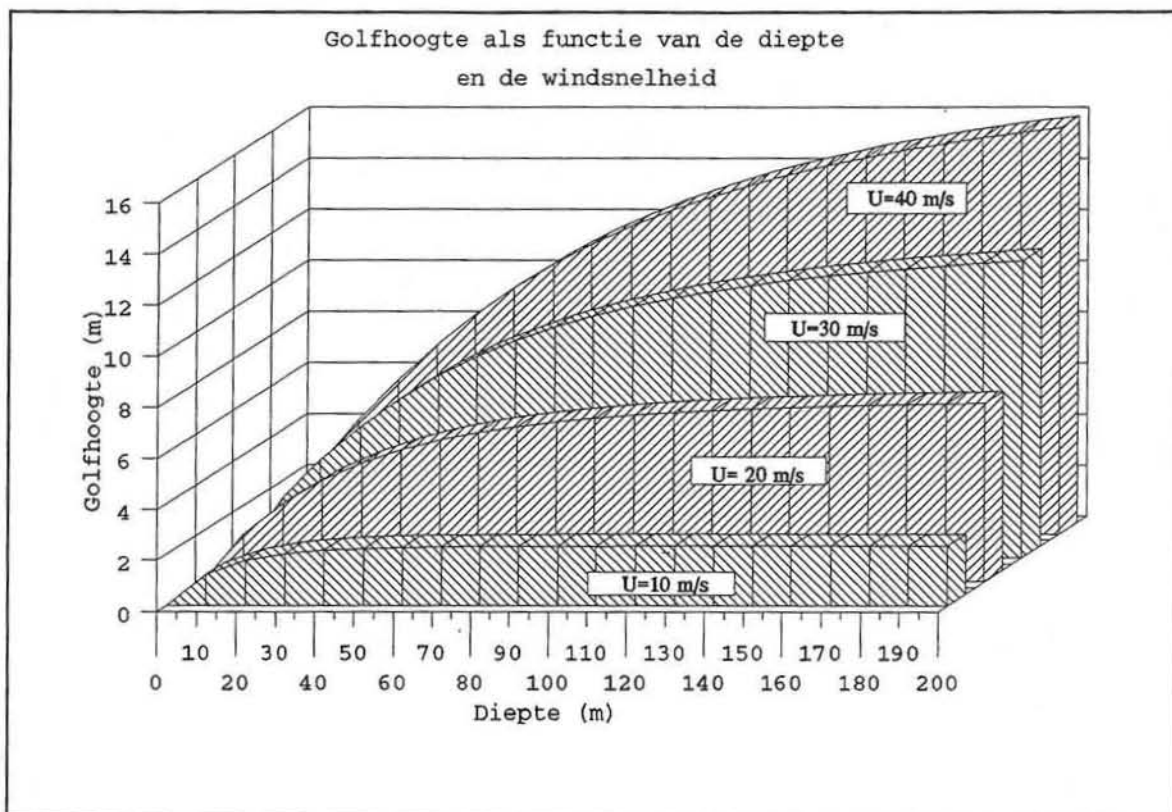


fig 6.23 Golfhoogte als functie van windsnelheid en diepte

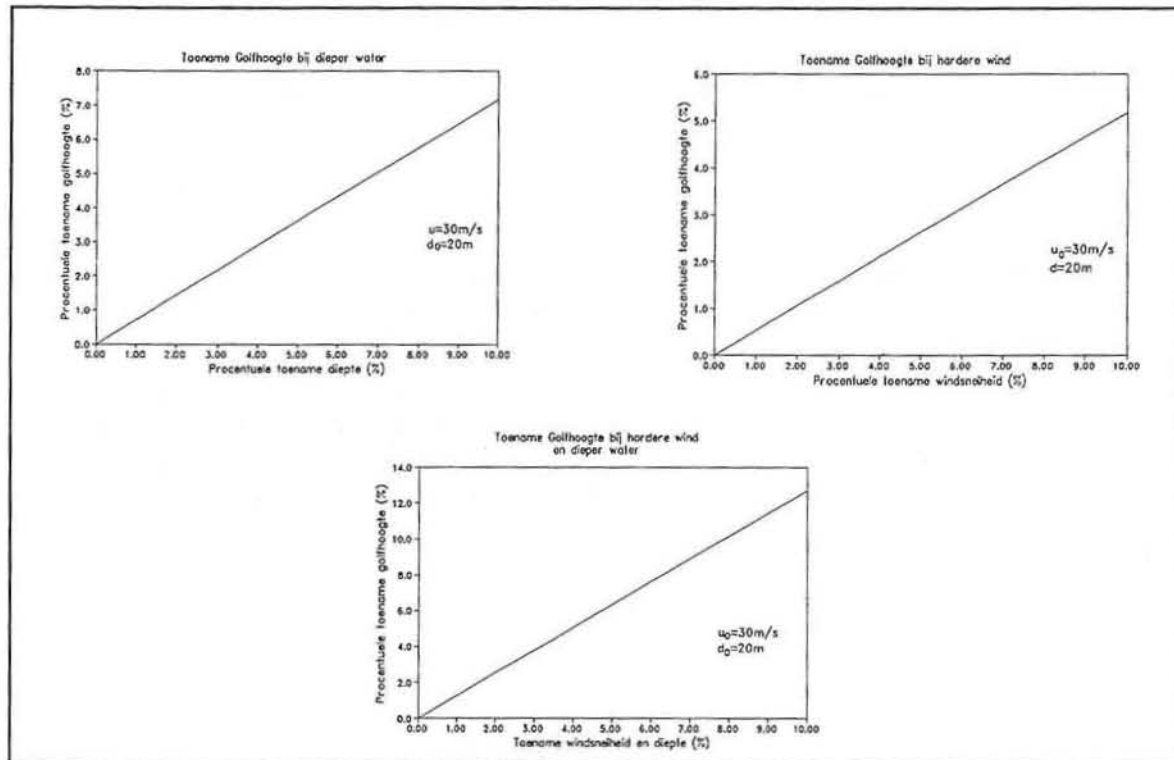


fig 6.24 Toename golfhoogte bij toename windsnelheid en diepte

omstandigheden in de zeereep plaatsvindt. Aangezien de berekeningen maar voor drie profielen zijn gemaakt, is het niet de bedoeling dat de gevonden percentages voor elk willekeurig dwarsprofiel worden gebruikt. De percentages zijn slechts bedoeld om een idee te krijgen van de invloed van het veranderen van de verschillende ontwerpparameters op de mate van duinafslag. Dit is toegepast voor de verschillende scenario's zoals die bepaald zijn ten behoeve van de nota "Kustverdediging na 1990". In de tabellen 6.18, 6.19 en 6.20, afgebeeld aan het eind van dit hoofdstuk (blz. 68,69), zijn alle percentages samengevat. Uit de tabellen blijkt wel dat het niet mogelijk is om éénduidige percentages te geven die voor een willekeurig profiel zouden kunnen gelden. Algemene conclusies over de effecten van het optreden van de verschillende scenario's zijn dan ook moeilijk aan te geven. Wel is duidelijk geworden dat de eventuele gevolgen van klimaatveranderingen gevolgen kunnen hebben voor de veiligheid van de Nederlandse duinen als waterkering. Tevens is gebleken dat, ondanks het (gedeeltelijk) anticiperen op de zeespiegelstijging door de kust op te hogen, de mate van duinafslag toeneemt. Hierbij is gebleken dat vooral het extra verhogen van het rekenpeil met meer dan de geldende zeespiegelstijging, terwijl het profiel slechts met dezelfde waarde als deze zeespiegelstijging wordt opgehoogd, een grote toename van de duinafslag tot gevolg heeft. Ook de toename in golfhoogte (en -periode) heeft een groot effect op de mate van duinafslag.

Als er toe wordt besloten het principe van uitgestelde aanleg toe te passen heeft dat een extra toename van de duinafslag tot gevolg. Opvallend hierbij is dat wanneer de toename van de duinafslag zonder uitgestelde aanleg al erg groot is de extra toename van de duinafslag bij uitgestelde aanleg niet erg groot is. Is daarentegen de toename zonder uitgestelde aanleg gering dan blijkt het effect van uitgestelde aanleg juist groter te zijn.

6.6.1 De achtergrond van de aangenomen scenario's

Uit de tabellen 6.18, 6.19 en 6.20 blijkt dat in het geval van het ongunstige scenario de duinafslag veel meer toeneemt dan bij het beleidsscenario. Dit houdt in dat als wordt uitgegaan van dit scenario er veel meer aanvullende maatregelen nodig zullen zijn om de veiligheid te waarborgen. Het is echter maar de vraag welke van de scenario's zal optreden. Dat de zeespiegel stijgt, dat is nauwelijks aan twijfel onderhevig, maar in welke mate dat zal gebeuren, is de vraag. Ook de toename van de golfhoogte is twijfelachtig. Er is veel onderzoek naar dit fenomeen gedaan. Uit dat onderzoek zijn echter nog geen bewijzen naar voren gekomen dat de stormintensiteit inderdaad toeneemt. Aan het begin van deze eeuw kwamen er bijvoorbeeld ook relatief veel stormen voor. De grote stormintensiteit van de laatste jaren kan dus net zo goed het gevolg zijn van een golfbeweging door de eeuwen heen als van klimaatveranderingen. Natuurlijk is het wel zo dat als de zeespiegel stijgt, de golfhoogte toe kan nemen. In figuur 6.23 (naar: Shore Protection Manual 1984) is de golfhoogte als functie van de windsnelheid en de diepte weergegeven. Aan de hand van dergelijke grafieken kan bepaald worden wat de toename van de golfhoogte zal zijn bij een toename van de windsnelheid en de diepte. Wat de toename van de windsnelheid zal zijn, is moeilijk te zeggen. In figuur 6.24 zijn de invloeden van diepte en windsnelheid nog eens apart uitgezet alsmede de totale invloed. Als gekeken wordt bij een diepte van 20 m en uitgegaan wordt van een zeespiegelstijging van 0,85 m dan bedraagt de toename van de diepte 4,25 %. Uitgaande van een windsnelheid van 30 m/s, die mogelijk met 10 % toeneemt, valt af te leiden dat de golfhoogte ongeveer met 8 % toeneemt. De aanname voor het ongunstige scenario lijkt dus een redelijke aanname, hoewel over de toename van de windsnelheid dus

Toename rekenpeil (m)	Toename golfhoogte (%)	Toename golfperiode (s)	Toename duinafslag bij geheel opgehoogd profiel (%)	Extra toename duinafslag bij uitgestelde aanleg (%)
0,20	0	0	1,4	2,9
0,60	0	0	4,2	8,4
0,85	0	0	6,3	14,4
0,40	0	0	2,8	8,0
1,20	0	0	9,3	15,5
1,70	0	0	14,7	15,7
0,20	0	0	1,4	2,9
0,65	0	0	6,3	8,4
1,50	8	1	41,4	11,1
0,40	0	0	2,8	8,0
1,30	0	0	13,5	16,4
3,00	16,64	2	91,5	8,6

Tabel 6.18 Toename duinafslag in Rijnland bij toename parameters

Toename rekenpeil (m)	Toename golfhoogte (%)	Toename golfperiode (s)	Toename duinafslag bij geheel opgehoogd profiel (%)	Extra toename duinafslag bij uitgestelde aanleg (%)
0,20	0	0	2,9	0,0
0,60	0	0	9,6	0,0
0,85	0	0	14,7	0,3
0,40	0	0	6,1	0,0
1,20	0	0	23,2	0,2
1,70	0	0	39,4	2,6
0,20	0	0	2,9	0,0
0,65	0	0	11,9	0,2
1,50	8	1	54,3	2,6
0,40	0	0	6,1	0,0
1,30	0	0	28,5	1,7
3,00	16,64	2	145,9	8,5

Tabel 6.19 Toename duinafslag in Schouwen bij toename parameters

geen zekerheid bestaat. Als alleen wordt uitgegaan van de toename van de waterdiepte met 4,25 % dan bedraagt de toename van de golfhoogte nog slechts 3%. Het is dus moeilijk een uitspraak te doen over de te verwachten golfhoogte. Hetzelfde geldt voor de stormopzet aangezien deze ook afhankelijk is van de diepte en de windsnelheid. Gezien de uitkomsten van dit onderzoek lijkt het ongunstige scenario in ieder geval een absolute bovengrens voor de toename van duinafslag aan te geven. Het is echter onwaarschijnlijk dat dit scenario ook voor de 23^e eeuw nog op zal kunnen gaan. In dat geval worden de ontwerpparameters wel erg groot en neemt de duinafslag erg veel toe ten opzichte van de huidige situatie. Het lijkt dan ook aan te bevelen de ruimte te reserveren die volgens het ongunstige scenario nodig zal zijn voor eventuele duinverzwaringen, maar voorlopig af te wachten welke veranderingen in werkelijkheid gaan optreden alvorens daadwerkelijk maatregelen te nemen.

Toename rekenpeil (m)	Toename golfhoogte (%)	Toename golfperiode (s)	Toename duinafslag bij geheel opgehoogd profiel (%)	Extra toename duinafslag bij uitgestelde aanleg (%)
0,20	0	0	4,1	0,6
0,60	0	0	15,2	0,6
0,85	0	0	24,2	2,5
0,40	0	0	9,5	0,6
1,20	0	0	39,5	2,3
1,70	0	0	66,1	3,3
0,20	0	0	4,1	0,6
0,65	0	0	19,5	1,3
1,50	8	1	78,9	0,9
0,40	0	0	9,5	0,6
1,30	0	0	60,8	3,4
3,00	16,64	2	170,9	1,2

Tabel 6.20 Toename duinafslag in Terschelling bij toename parameters

7 Langstransporten langs de Hollandse kust

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat de eventuele klimaatveranderingen voor gevolgen hebben voor de langstransporten langs de Nederlandse kust. Hierbij is alleen de Hollandse kust in beschouwing genomen. In hoofdstuk 2 is beschreven dat bij de Waddenkust en de Zeeuwse kust andere processen een rol spelen dan bij de Hollandse kust. In hoofdstuk 8 wordt nader op de Waddenkust en Zeeuwse kust ingegaan.

Wanneer de langtransport-gradiënten langs de Nederlandse kust veranderen, kan dat gevolgen hebben voor de zandhuishouding. Momenteel wordt jaarlijks ongeveer $6,5 \cdot 10^6$ m³ zand gesuppleerd ter compensatie van de optredende erosie. Als de erosie toeneemt zal er in de toekomst meer zand moeten worden gesuppleerd. Het is dus van belang dat er voor de eventuele toename van de langtransport-gradiënten een waarde wordt bepaald. Het is echter niet goed mogelijk de precieze gradiënten te bepalen zoals die op zullen gaan treden langs de Hollandse kust. Daarom is in dit hoofdstuk getracht enkele percentages te vinden voor de toename van de transporten langs de kust. Vervolgens is er vanuit gegaan dat wanneer de transporten met een bepaalde faktor toenemen, de gradiënten ongeveer met dezelfde faktor zullen toenemen.

Om de toename van de langstransporten te bepalen is gebruik gemaakt van het computerprogramma UNIBEST-LT. Met dit programma is om te beginnen een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierdoor is een beeld verkregen van de te verwachten veranderingen in de toekomst. Vervolgens zijn er drie profielen langs de Hollandse kust doorgerekend, te weten een profiel bij Camperduin, het al eerder gebruikte profiel uit het kustvak Rijnland en een profiel in de buurt van Hoek van Holland. Voor alle drie deze profielen zijn dezelfde golfgegevens gebruikt. De golven zijn gemeten met behulp van de golfmeetboei bij IJmuiden (YM6). Deze boei meet alleen golfhoogte en -periode. De richtingsgegevens zijn bepaald door windrichtingsgegevens aan de golfgegevens toe te voegen. De gebruikte golfgegevens zijn samengevat in Bijlage II. Omdat het er in dit hoofdstuk om gaat een beeld te krijgen van de relatieve toename van de langstransporten, is de invloed van het getij op het langtransport buiten beschouwing gelaten.

7.2 Gevoeligheidsanalyse

Om een idee te krijgen van de invloed van verschillende parameters, zoals de golfhoogte, golfperiode, hoek van inval en korreldiameter, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Dit is gedaan voor het al eerder gebruikte profiel uit het kustvak Rijnland. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 7.1, 7.2, 7.3 en 7.4. De coëfficiënten die in het Unibest programma zijn gebruikt, zijn in Bijlage III samengevat.

De invloed van de golfhoogte

Om de invloed van de golfhoogte te bepalen zijn alle golfhoogtes (zie bijlage II) met steeds hetzelfde percentage verhoogd. In figuur 7.1 is te zien dat het langtransport volgens de Cerc-formule ongeveer kwadratisch toeneemt. Volgens de Bijker-formule neemt het langtransport minder dan kwadratisch toe.

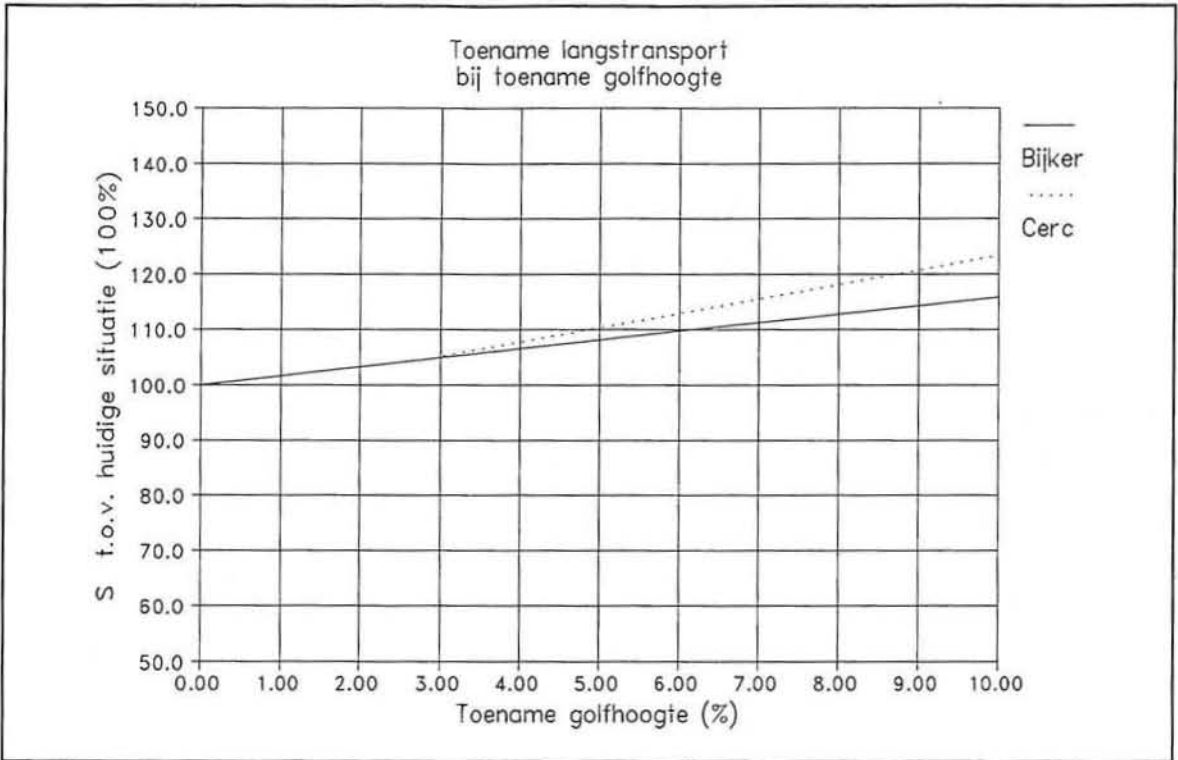


fig 7.1 Toename langtransport bij toename golfhoogte

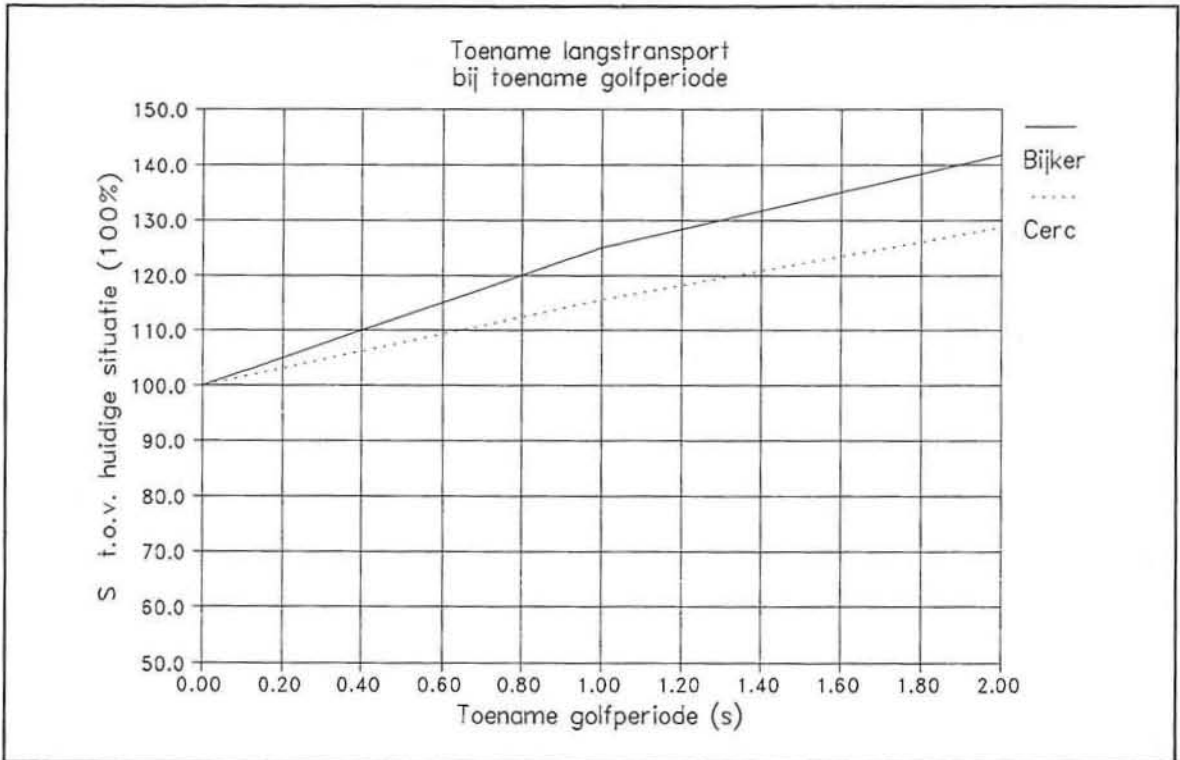


fig 7.2 Toename langtransport bij toename golfperiode

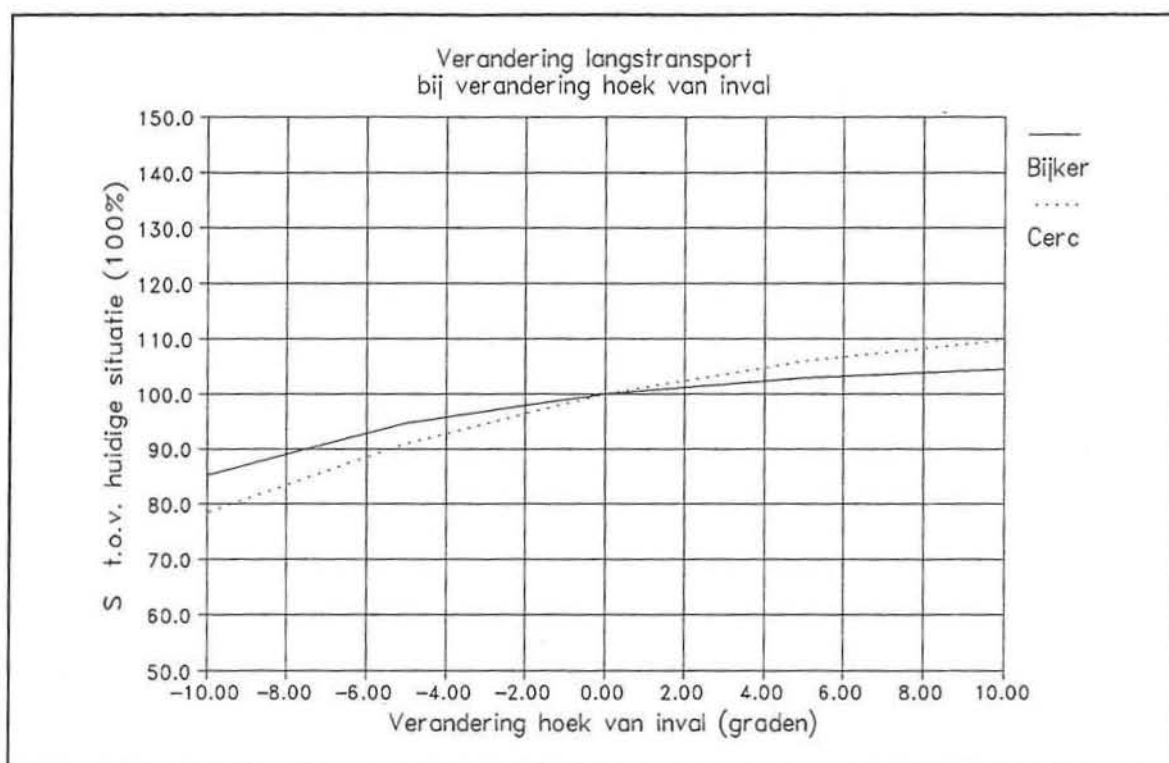


fig 7.3 Verandering langtransport bij verandering hoek van inval

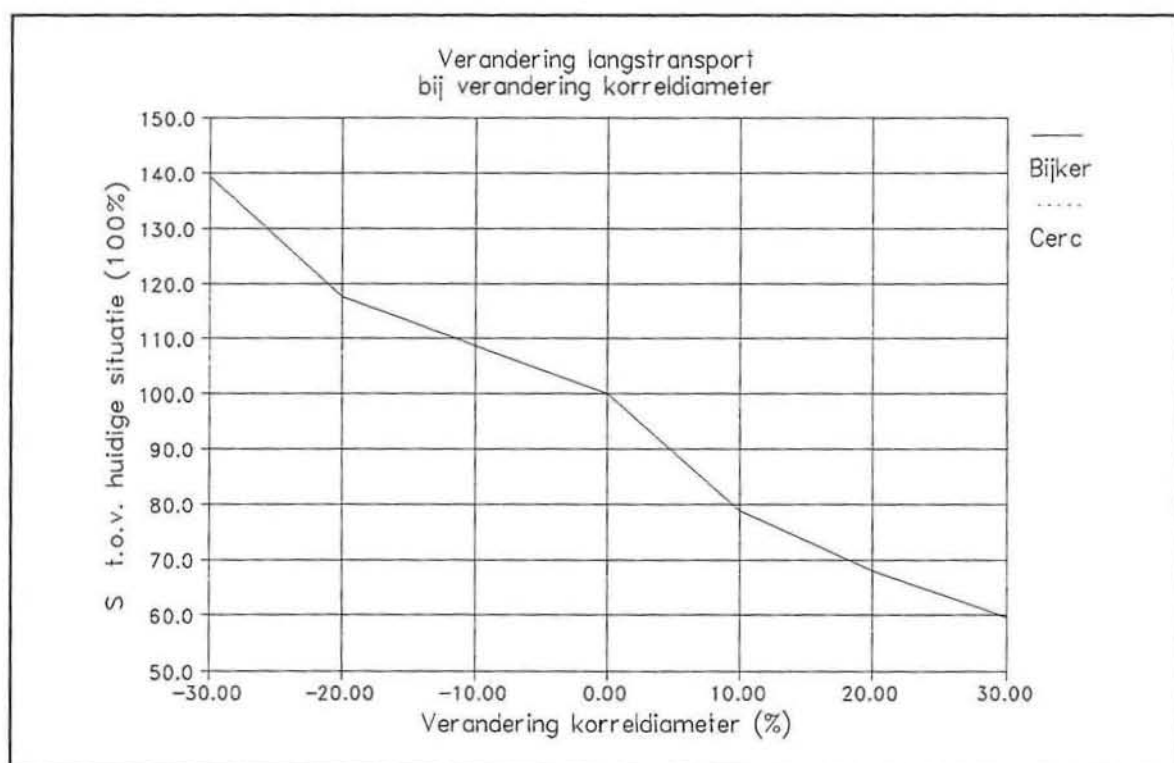


fig 7.4 Verandering langtransport bij verandering korreldiameter

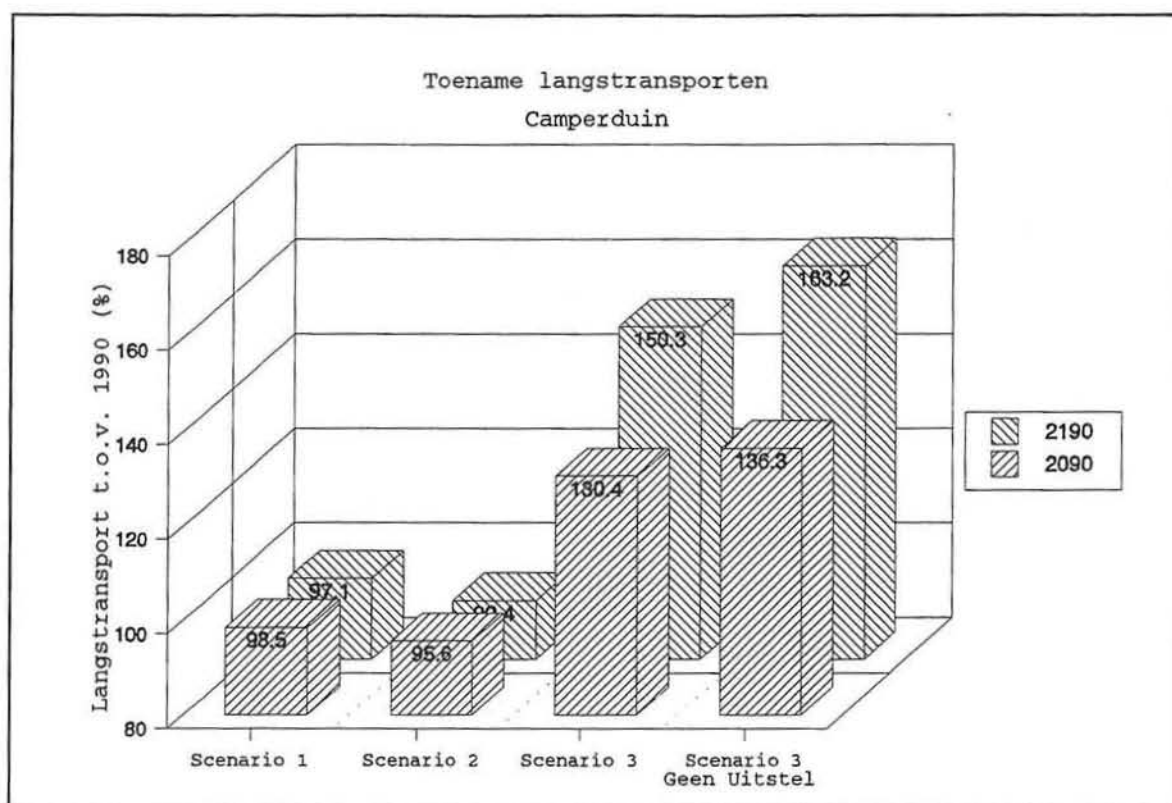


fig 7.5 Toename langstransport Camperduin volgens scenario's

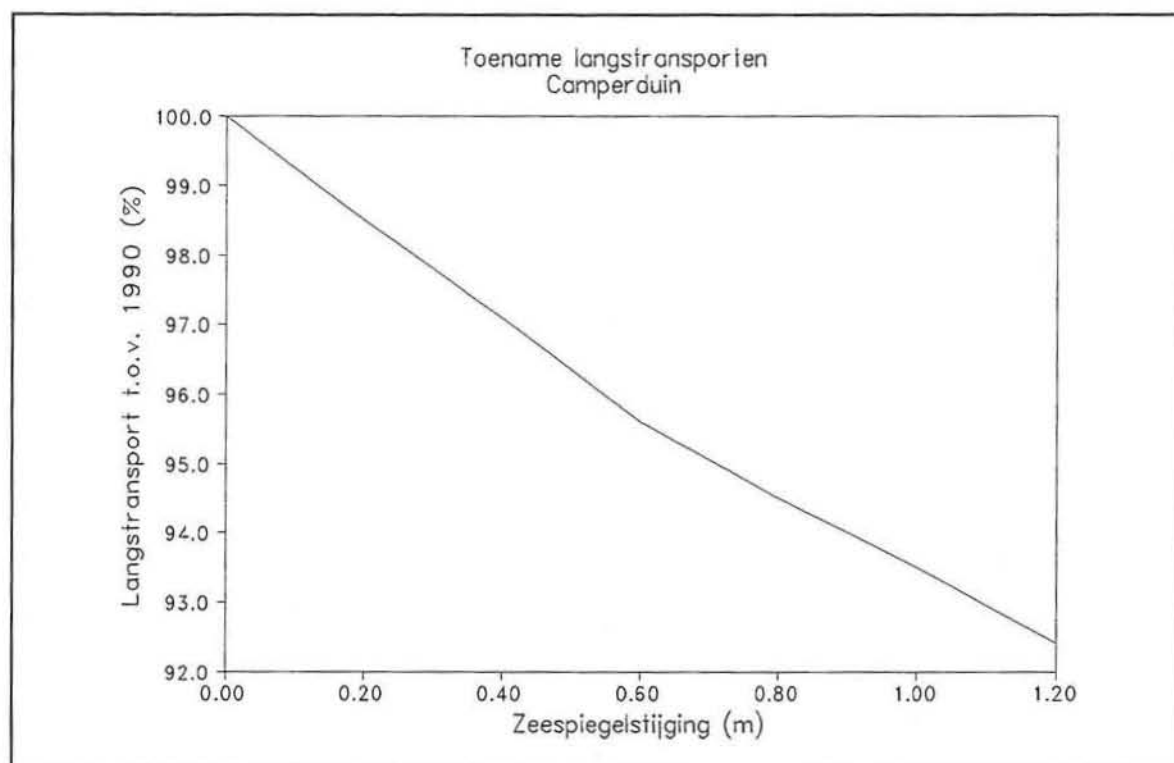


fig 7.6 Toename langstransport t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg

De invloed van de golfperiode

In figuur 7.2 is te zien dat een toename van de golfperiode een grote invloed heeft op het langstransport. Om dit te bepalen zijn alle golfperiodes met dezelfde waarde vermeerderd. Hierbij geeft de Bijker-formule een grotere toename dan de Cerc-formule. Het lijkt vreemd dat de Cerc-formule een toename in het transport laat zien terwijl de golfperiode niet in de formule voorkomt. De reden voor de toename is dat de golfperiode de mate van refractie bepaalt. De mate van refractie bepaalt de hoek van inval op de brekerlijn die wel van invloed is op de uitkomst van berekeningen met de Cerc-formule.

De invloed van de hoek van inval

In figuur 7.3 is het verloop van het langstransport bij een verandering van de hoek van inval te zien. Hierbij zijn alle golven over eenzelfde hoek verdraaid, wat op hetzelfde neerkomt als een verdraaiing van de kustlijn over dezelfde hoek (maar dan in tegengestelde richting). Het verloop is volgens de Cerc-formule sterker dan volgens de Bijker-formule.

De invloed van de korreldiameter

In figuur 7.4 tenslotte is te zien dat een verandering van de sedimentgrootte een grote invloed heeft op de langstransporten (alleen volgens Bijker). Hieruit volgt dat wanneer de suppleties in de toekomst uitgevoerd gaan worden met zand met een kleinere korreldiameter de langstransporten aanzienlijk toe kunnen nemen. Aan de andere kant is het dus aantrekkelijk om in de toekomst met groffer materiaal te gaan suppleren. Dit kan de toename van de langstransporten door bijvoorbeeld een toename van de golfhoogte (groten)deels compenseren.

7.3 Toepassingen voor de voorspelde scenario's

In deze paragraaf zal voor drie dwarsprofielen langs de Hollandse kust worden nagegaan wat de in hoofdstuk 2 genoemde scenario's voor invloed hebben op het langstransport. Hierbij zal gebruik worden gemaakt van de Bijker-formule. Wanneer er vanuit wordt gegaan dat het handhavingsbeleid volledig wordt uitgevoerd, dan zal er voor de eerste twee scenario's niets veranderen. De zeespiegel stijgt wel maar de kust wordt evenveel opgehoogd. Alleen bij scenario 3 (ongunstige) waar de golfhoogte en de hoek van inval veranderen, zullen er veranderingen optreden in het langstransport.

Wanneer het handhavingsbeleid niet volledig wordt uitgevoerd, maar alleen de waterlijn op zijn plaats wordt gehouden, is er sprake van uitgestelde aanleg (zie hoofdstuk 3). Dit heeft invloed op het verloop van de golfhoogte en de hoek van inval. In dit geval treden dus voor alle scenario's veranderingen op. Voor de eerste twee scenario's zal dus alleen gekeken worden naar het effect van uitgestelde aanleg. Voor het derde scenario zal naast het effect van uitgestelde aanleg tevens gekeken worden naar het effect van een toename van de golfhoogte met 10 procent** per 100 jaar en de verandering van de hoek van inval met 10^0 per 100 jaar. Deze verdraaiing wordt aangenomen in de richting waarbij de langstransporten toenemen.

7.3.1 Langstransport in kustvak Camperduin

In het kustvak Noord-Holland is een (willekeurig) profiel gekozen bij Camperduin wat

** Deze 10 % geldt voor gemiddelde omstandigheden. Onder extreme omstandigheden bedraagt de toename 8 %.

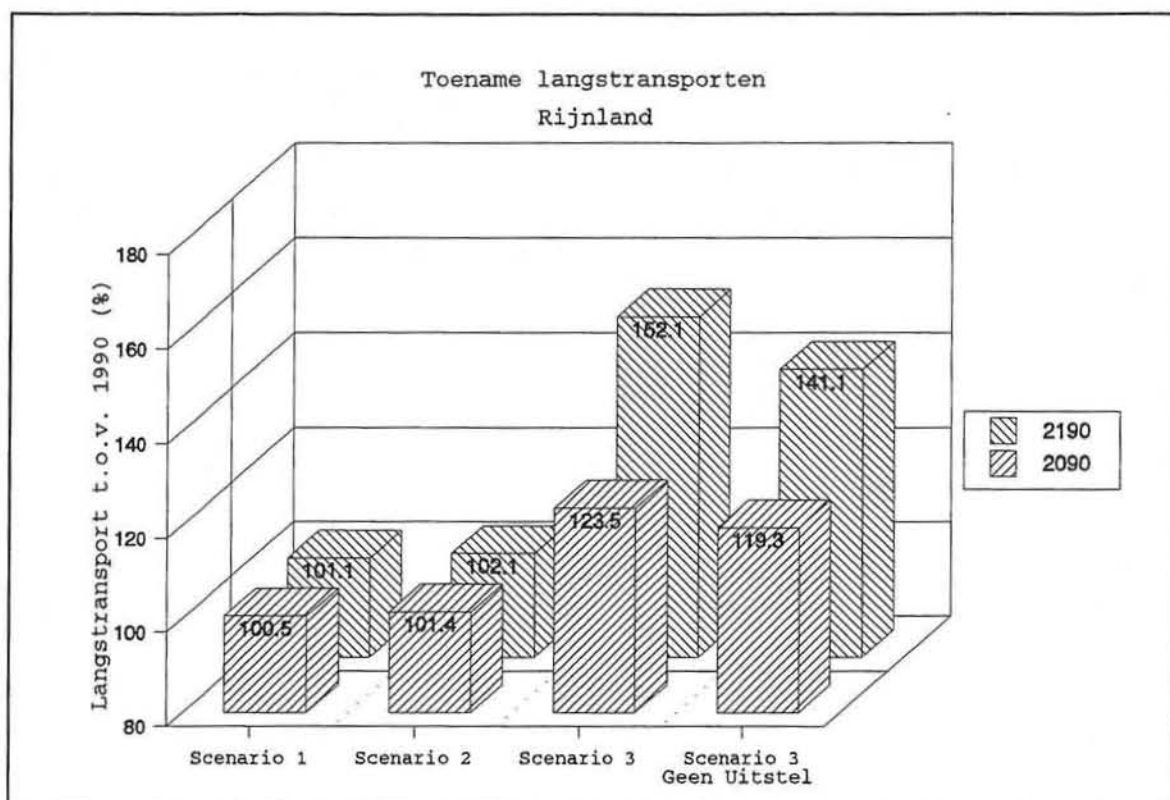


fig 7.7 Toename langstransport Rijnland volgens scenario's

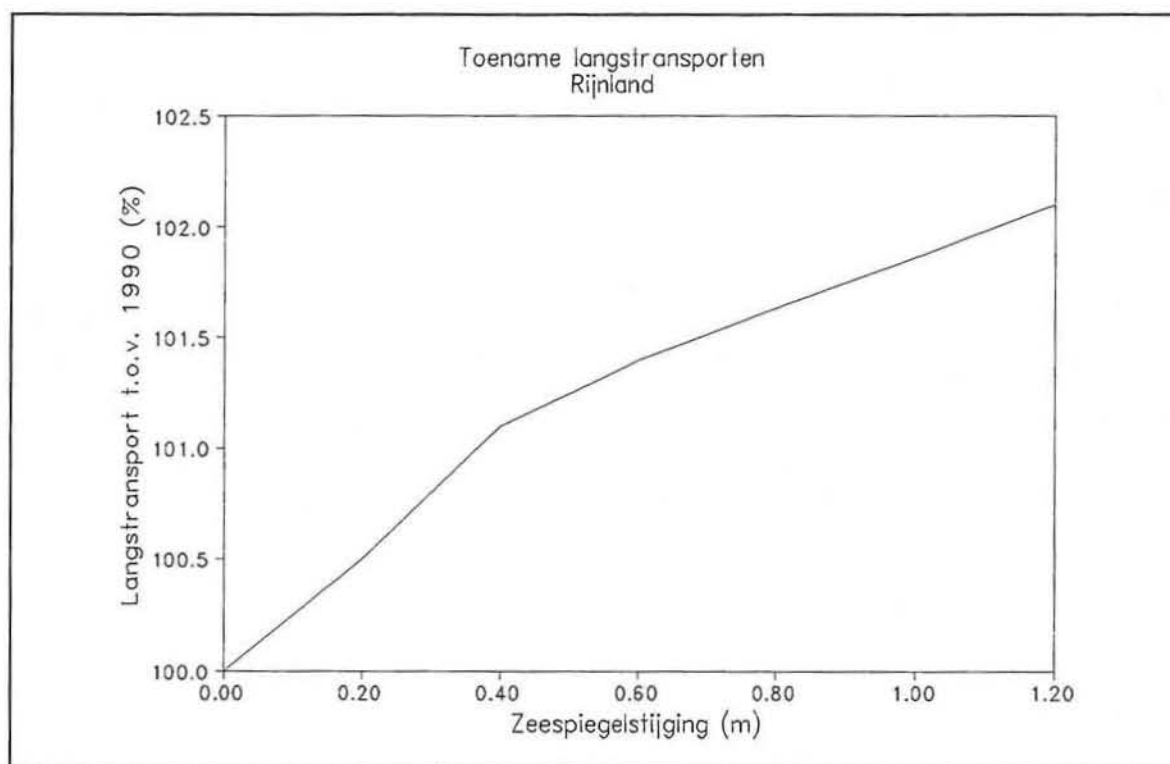


fig 7.8 Toename langstransport Rijnland t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg

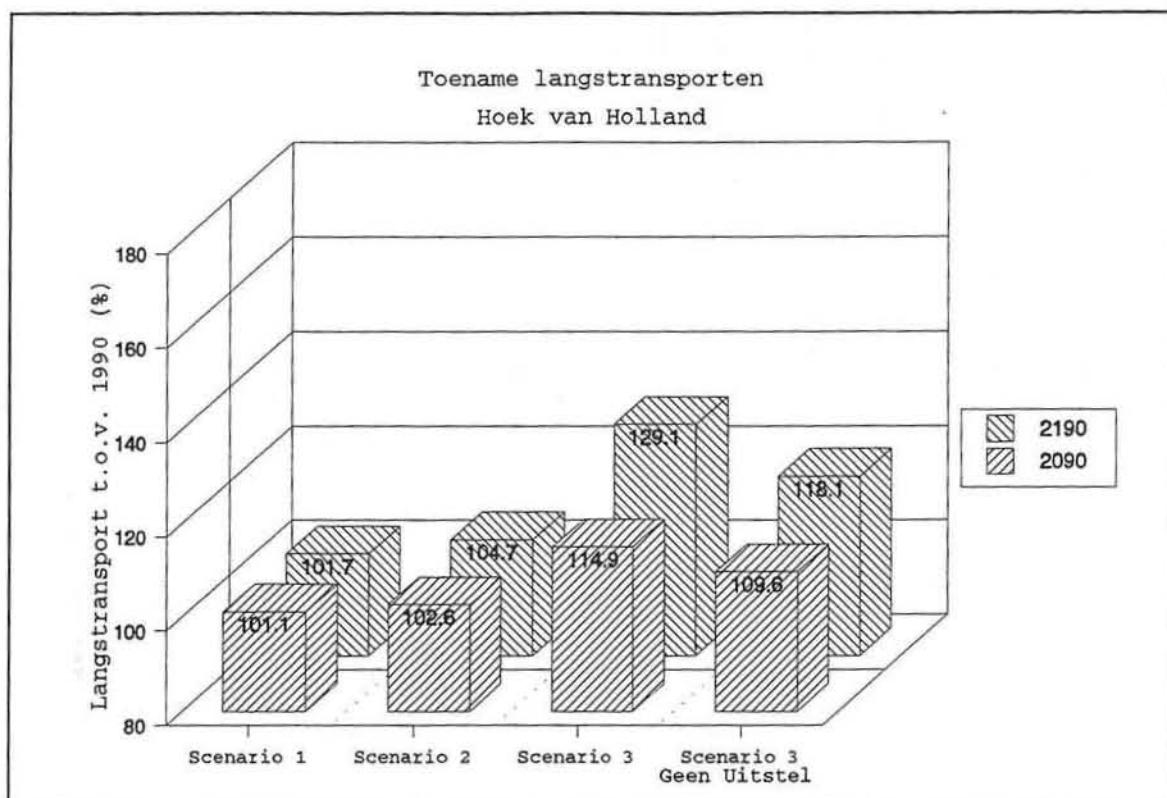


fig 7.9 Toename langstransport Hoek van Holland volgens scenario's

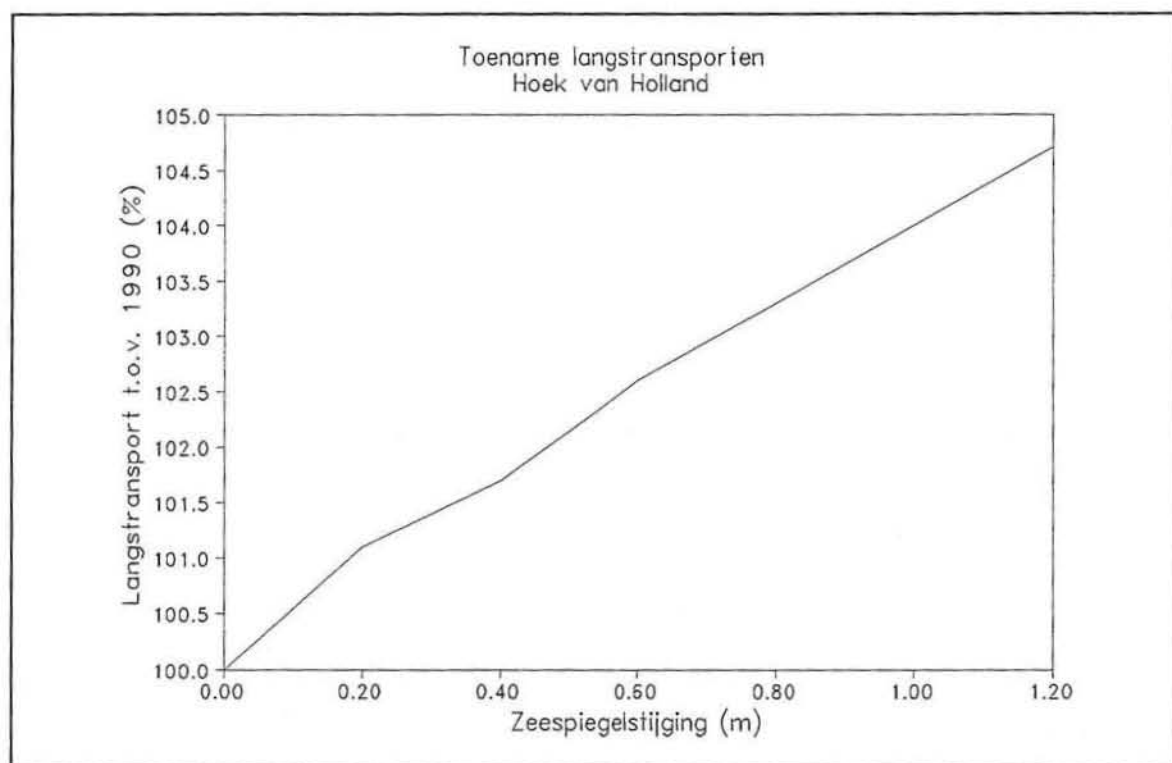


fig 7.10 Toename langstransport t.g.v. zeespiegelstijging bij uitgestelde aanleg

Jaar	Scenario	ZSS (m)	Uitstel	H (%)	Hoek (°)	Langtransport (%)
1990	0	0	-	0	0	100
2090	1	0,20	Ja	+0	+0	98,5
2090	2	0,60	Ja	+0	+0	95,6
2090	3	0,85	Ja	+10	+10	130,4
2090	3	0,85	Nee	+10	+10	136,3
2190	1	0,40	Ja	+0	+0	97,1
2190	2	1,20	Ja	+0	+0	92,4
2190	3	1,70	Ja	+20	+20	150,3
2190	3	1,70	Nee	+20	+20	163,2

Tabel 7.1 Resultaten Camperduin

Jaar	Scenario	ZSS (m)	Uitstel	H (%)	Hoek (°)	Langtransport (%)
1990	0	0	-	0	0	100
2090	1	0,20	Ja	+0	+0	100,5
2090	2	0,60	Ja	+0	+0	101,4
2090	3	0,85	Ja	+10	+10	123,5
2090	3	0,85	Nee	+10	+10	119,3
2190	1	0,40	Ja	+0	+0	101,1
2190	2	1,20	Ja	+0	+0	102,1
2190	3	1,70	Ja	+20	+20	152,1
2190	3	1,70	Nee	+20	+20	141,1

Tabel 7.2 Resultaten Rijnland

Jaar	Scenario	ZSS (m)	Uitstel	H (%)	Hoek (°)	Langtransport (%)
1990	0	0	-	0	0	100
2090	1	0,20	Ja	+0	+0	101,1
2090	2	0,60	Ja	+0	+0	102,6
2090	3	0,85	Ja	+10	+10	114,9
2090	3	0,85	Nee	+10	+10	109,8
2190	1	0,40	Ja	+0	+0	101,7
2190	2	1,20	Ja	+0	+0	104,7
2190	3	1,70	Ja	+20	+20	129,1
2190	3	1,70	Nee	+20	+20	118,1

Tabel 7.3 Resultaten Hoek van Holland

voldoende ver verwijderd ligt van de Hondsbossche zeekering. De oriëntatie van dit gedeelte van de kust is 3° (NNO). Voor dit profiel zijn volgens de hierboven genoemde scenario's langstransport berekeningen uitgevoerd. In de huidige toestand bedraagt het berekende netto sedimenttransport met de gekozen randvoorwaarden ongeveer $3,4 \cdot 10^5$ m³ per jaar in noordelijke richting. De resultaten van de berekeningen volgens de verschillende scenario's zijn weergegeven in de figuren 7.5 en 7.6. In deze figuren is te zien dat in dit kustvak het langstransport eerder afneemt dan toeneemt wanneer het geval van uitgestelde aanleg wordt beschouwd. Kennelijk is het zo dat de som van de transporten per afzonderlijke golfrichting netto een afname laat zien. Alleen bij scenario 3 is er sprake van een toename ten gevolge van de verandering van de golfhoogte en hoek van inval. Ook bij dit scenario heeft uitgestelde aanleg in ieder geval geen nadelig effect op het langstransport.

7.3.2 Langstransport in het kustvak Rijnland

In het kustvak Rijnland is hetzelfde profiel gekozen dat al eerder gebruikt is in hoofdstuk 6. De oriëntatie van de kustlijn is hier 12° (NNO). In dit kustvak bedraagt het berekende huidige sedimenttransport ongeveer $5,7 \cdot 10^5$ m³ per jaar in noordelijke richting. De gevolgen van het optreden van de verschillende scenario's zijn weergegeven in de figuren 7.7 en 7.8. In dit kustvak laat het langstransport wel een geringe toename zien bij de eerste twee scenario's. Volgens scenario 3 treedt weer een grote toename op in het langstransport.

7.3.3 Langstransport in het kustvak Delfland

In het kustvak Delfland is een profiel gekozen in de buurt van Hoek van Holland. De oriëntatie van de kustlijn is hier 38° (NOO). Hier bedraagt het berekende sedimenttransport ongeveer $5,3 \cdot 10^5$ m³ per jaar in noordelijke richting. In de figuren 7.9 en 7.10 zijn de gevolgen van het optreden van de verschillende scenario's weergegeven. Ook hier weer een toename in het langstransport volgens alle scenario's waarbij scenario 3 (al dan niet bij uitgestelde aanleg) de grootste toename tot gevolg heeft. Opvallend is dat in dit geval het langstransport niet toeneemt bij een hoekverdraaiing maar afneemt. Kennelijk is de huidige oriëntatie van de kustlijn zodanig dat het transport bij het gekozen golfklimaat maximaal is.

7.3.4 Totaaloverzicht van de toename van het langstransport

In de tabellen 7.1, 7.2 en 7.3 worden alle resultaten nog eens samengevat. In de kolom met de titel "Uitstel" wordt aangegeven of er sprake is van uitgestelde aanleg.

Over het algemeen kan ook gesteld worden dat uitgestelde aanleg een gering effect heeft op de toename van het langstransport. De toename van golfhoogte heeft wel een groot effect op de toename van het langstransport. Ook de verandering van de hoek van inval heeft een groot effect op de toename van het langstransport. Samenvattend zou gesteld kunnen worden dat het optreden van het ongunstige scenario een toename van 10 tot 30 procent per 100 jaar tot gevolg heeft. Bij het optreden van het beleidsscenario of het anticiperende scenario hoeft geen rekening te worden gehouden met een toename van het langstransport. Het optreden van uitgestelde aanleg heeft ongeveer een toename van 5 procent per 100 jaar tot gevolg.

8 Het Waddengebied en de Zeeuwse kust

8.1 Inleiding

Er is al verscheidene malen ter sprake gekomen dat de processen die een rol spelen bij het Waddengebied en langs de Zeeuwse kust verschillen van de processen die de zandhuishouding langs de Hollandse kust bepalen. In dit hoofdstuk zal dieper op deze afwijkende processen worden ingegaan. Beseft moet worden dat de processen in deze kustgebieden niet alleen anders maar ook ingewikkelder zijn dan de processen bij de Hollandse kust. Het valt buiten het kader van dit onderzoek om in detail op deze processen in te gaan. Volstaan zal worden met een overzicht van wat er in deze kustgebieden speelt en wat dat betekent voor het handhavingsbeleid.

8.2 De Waddenzee

Door de eeuwen heen heeft de Waddenzee zich kunnen handhaven. Het systeem is kennelijk nagenoeg in evenwicht. Het systeem heeft zich aan de voortdurend optredende zeespiegelstijging aangepast door de bodem op te hogen. De evenwichtstoestand van de zeegaten is ook dynamisch van karakter. Morfologische veranderingen in een dergelijk systeem worden voor het grootste deel veroorzaakt door veranderingen in het getijprisma. Er bestaat dan ook een duidelijk verband tussen het getijprisma en de dwarsdoorsnede van een zeegat. Dit verband blijkt ongeveer lineair te zijn. In de zeegaten worden grote hoeveelheden sediment vervoerd. Doordat de ebstroom zich buiten het zeegat uitspreidt, wordt sediment afgezet. Dit sediment vormt de zogenaamde buitendelta. Het volume van het sediment in zo'n buitendelta blijkt ook weer in verband te staan met het getijprisma. Het getijprisma kan veranderen door een verandering van het kombergingsoppervlak. Wanneer bijvoorbeeld het kombergingsoppervlak wordt verkleind, neemt het getijprisma af. De geulen in het systeem zijn dan te diep voor de kleinere hoeveelheden af te voeren water. Deze geulen worden dan vervolgens opgevuld met sediment uit de buitendelta. Dit is bijvoorbeeld het geval geweest bij de afsluiting van de Zuiderzee. Het kombergingsoppervlak is daardoor gereduceerd. De zeegaten zijn kleiner geworden en de geulen ondieper. Dit aanpassingsproces is waarschijnlijk nog steeds aan de gang.

Wanneer zeespiegelstijging wordt beschouwd, geldt ook dat er veranderingen optreden. In het geval dat zeespiegelstijging zou optreden als een plotselinge verhoging, dan zou het getijprisma worden vergroot. De hoogte van de platen is in dat geval nog niet aangepast, zodat ze dan niet meer (of nog slechts gedeeltelijk) droog vallen tijdens laagwater. In werkelijkheid is zeespiegelstijging echter een geleidelijk proces. Wanneer (versnelde) zeespiegelstijging gaat optreden, wordt de capaciteit van het bekken om sediment te vangen groter. De waterstand boven de platen neemt toe waardoor de stroomsnelheden boven de platen afnemen. Hierdoor zal zich meer sediment afzetten op de platen. Hetzelfde geldt voor de geulen. Zolang er voldoende sediment kan worden aangevoerd om aan deze "sedimenthonger" te voldoen zal het systeem de zeespiegelstijging dus blijven volgen. De buitendelta's van de Waddenzee hoeven echter niet te veranderen. Het getijprisma verandert immers niet wezenlijk door de geleidelijke zeespiegelstijging. Het volume van de buitendelta's moet dus gelijk blijven. In eerste instantie zullen de buitendelta's wel sediment leveren, maar dit verlies zal dan weer worden gecompenseerd door sediment te onttrekken aan de eilandkusten. Er kan dus gesteld worden

Waddenzee Effecten	Sedimentvraag (10 ⁶ m ³ per jaar)		
	1990	2040	2090
Huidige zeespiegelstijging 20cm per eeuw	4-5	4-5	4-5
Zand- en schelpenwinning	8-9	6	6
Gaswinning	0,3	1-2	0
Afsluiting Zuider- en Lauwerszee	2-3	0,7	0,3
Opslibbing in de randzones en kwelders	0-9	0-9	0-9
Totale sedimentvraag	14-26	12-23	10-20
Extra sedimentvraag bij zeespiegelstijging 60cm per eeuw		4-5	6-7
Extra sedimentvraag bij zeespiegelstijging 85cm per eeuw		6-7	9-10

Tabel 8.1 Sedimentvraag Waddenzee

Scenario	ZSS (m/eeuw)	Zandvraag 1990 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2040 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2090 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2190 (10 ⁶ m ³ /jaar)
Beleids- scenario	0,20	14-26 gem. 20,0	12-23 gem. 17,5	10-20 gem. 15,0	10-20 gem. 15,0
Anticiperend scenario	0,60	-	16-28 gem. 22,0	16-27 gem. 21,5	16-27 gem. 21,5
Ongunstig scenario	0,85	-	18-30 gem. 24,0	19-30 gem. 24,5	19-30 gem. 24,5

Tabel 8.2 Totale zandvraag Waddenzee bij de verschillende scenario's

dat de sedimenthonger, die ontstaat door zeespiegelstijging, gestild wordt door het eroderen van de eilandkusten. Voor het handhavingsbeleid betekent dit dat om aan de sedimentvraag te voldoen, extra gesuppleerd zal moeten worden om de kustlijn van de Waddeneilanden op zijn plaats te houden. Deze extra hoeveelheid komt boven op de hoeveelheden die benodigd zijn om de zeespiegelstijging te volgen (zie hoofdstuk 4). Omdat de transportprocessen ten gevolge van de sedimentvraag van de Waddenzee overheersend zullen zijn ten opzichte van de langstransportprocessen, zijn voor het Waddengebied in hoofdstuk 7 geen langstransportberekeningen uitgevoerd hoewel ook hier veranderingen kunnen optreden in de langstransportgradiënten. De grootte van de sedimentvraag van de Waddenzee zal in grote mate bepalend zijn voor de hoeveelheden te suppleren zand. De grootte van de sedimentvraag wordt bepaald door de volgende effecten:

- **Zeespiegelstijging**
- **Zand- en schelpenwinning**
Door zand (en schelpen) te onttrekken aan het systeem neemt de sedimentvraag toe. Het is mogelijk om in de toekomst maatregelen te nemen tegen deze winningen zodat de sedimentvraag hierdoor niet meer toeneemt
- **Gaswinning**
Door de gaswinning daalt de bodem van de Waddenzee plaatselijk. Hierdoor neemt de sedimentvraag dus ook toe
- **Afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee**
De sedimenthuishouding van de Waddenzee is zich nog steeds aan het aanpassen aan de afsluitingen van de Zuiderzee (1932) en de Lauwerszee (1969). Hiervoor is dus nog steeds sediment nodig
- **Opslibbing in de randzones en kwelders**
Aan de randen van de Waddenzee wordt slib afgezet waardoor de omvang van de Waddenzee afneemt. Hiervoor wordt dus sediment aan het systeem onttrokken. Het proces van verlanding lijkt zich sinds 1970 te stabiliseren, waardoor de sedimentvraag afneemt. Het kan echter zijn dat deze stabilisatie slechts tijdelijk is. Deze processen kunnen beïnvloed worden door menselijk ingrijpen

In tabel 8.1 (uit: "Het mysterie van de wadden...", RIKZ, 1994) worden voor bovenstaande punten waarden gegeven. Wanneer deze waarden worden toegepast op de scenario's die in deze studie zijn gebruikt dan wordt tabel 8.2 verkregen. Hierbij wordt er van uitgegaan dat de sedimentvraag volledig gecompenseerd wordt door de zandontrekking aan de eilandkusten. In werkelijkheid bestaat slechts 70 % tot 80 % van het sediment dat zich in het Waddengebied afzet uit zand, de rest uit slib. Dit zou in reductie gebracht kunnen worden. Omdat het onduidelijk is waar het slib vandaan zou moeten komen, is dat hier niet gedaan. Voor het jaar 2190 worden in tabel 8.1 geen waarden gegeven. Er kan vanuit worden gegaan dat de hoeveelheden na 2090 in ieder geval niet meer toenemen. Eenvoudshalve zijn voor 2190 dezelfde waarden gebruikt als die voor 2090.

De hoeveelheden genoemd in tabel 8.2 zijn erg groot. Het lijkt misschien op het eerste gezicht aan te bevelen de kustlijn van de Waddeneilanden vast te leggen door middel van harde

constructies. In dat geval verliezen de eilandkusten echter hun functie als sedimentleverancier. Dit heeft zeer nadelige gevolgen voor het ecologische systeem in de Waddenzee. Veel platen met een zeer rijke flora en fauna zullen hierdoor in de toekomst verdwijnen. Daarom is het belangrijk voor dit gebied het huidige beleid voort te zetten en dus de erosie te bestrijden door middel van suppleties. Het zand, benodigd voor deze suppleties, moet wel van buiten het systeem van de Waddenzee worden aangevoerd. Anders wordt het sedimentaanbod niet verhoogd, maar wordt er alleen zand binnen het systeem verplaatst.

8.3 De Zeeuwse kust

Door de afsluitingen van een aantal zeegaten in Zeeland is het karakter van de morfologische processen langs de Zeeuwse kust meer gaan lijken op de processen langs de Hollandse kust. Als eerste benadering kunnen de resultaten zoals verkregen in de vorige hoofdstukken wellicht ook op dit kustgedeelte worden toegepast. Hierbij moet wel worden bedacht dat het systeem sinds de afsluiting van de verschillende zeearmen nog niet in evenwicht is. Bij de Ooster- en Westerschelde spelen nog andere processen een rol. Deze processen zullen in de volgende paragrafen kort worden behandeld.

8.3.1 De Oosterschelde

Met de aanleg van de Oosterscheldekering is het natuurlijke evenwicht in de Oosterschelde ernstig verstoord. De doorstroomopeningen van de kering zijn veel kleiner dan de natuurlijke doorstroomopeningen zoals die er voor de aanleg van de kering waren. Het kombergingsoppervlak is derhalve te groot voor de doorstromingscapaciteit. Het natuurlijke systeem heeft daardoor de neiging naar een kleiner kombergingsgebied te streven. Hierbij is de natuur al een handje geholpen door de aanleg van de Krammerdam en de dam bij Bergen op Zoom. Dit is echter niet genoeg. Er is dan ook een zandvraag ontstaan van $500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Door de zeespiegelstijging neemt deze zandvraag ook nog toe. Om aan deze zandvraag te voldoen zullen platen in de Oosterschelde in eerste aanleg worden afgebroken. Naar verwachting zullen de platen $160 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ kunnen leveren. Dit heeft ernstige gevolgen voor het ecologische systeem. Waar de rest van het zand vandaan moet komen is nog niet duidelijk. De Oosterscheldekering laat jaarlijks slechts ongeveer $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sediment door. De invloed van de zandvraag van de Oosterschelde op de Zeeuwse kust zal daardoor niet groot zijn.

8.3.2 De Westerschelde

Naar verwachting zullen de effecten van zeespiegelstijging in de Westerschelde niet groot zijn. Het onderhoudsbaggerwerk aan de vaargeul is overheersend gebleken t.o.v. andere processen waaronder zeespiegelstijging. Sinds de laatste verdiepingen heeft het systeem alleen maar zand geëxporteerd. Bij de aanstaande verdieping van de Westerschelde kan dus niets anders worden verwacht. Van een sedimentbeweging van de Noordzeekust van de eilanden richting Westerschelde zal in dit geval dus geen sprake zijn.

9 Uitvoering van het handhavingsbeleid

9.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken zijn stapsgewijs de verschillende aspecten van het handhavingsbeleid besproken. In dit hoofdstuk zullen de verschillende aspecten worden samengevoegd. In de volgende paragraaf zullen eerst de hoeveelheden zand die nodig zijn om de zeespiegelstijging te volgen door te suppleren tot vier verschillende dieptelijnen worden samengevat. Daarna zullen, uitgaande van de hoeveelheid van $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ die momenteel jaarlijks wordt gesuppleerd, de hoeveelheden zand worden gegeven die nodig zijn om in de toekomst de erosie ten gevolge van (veranderende) langstransportgradiënten te compenseren. Tenslotte wordt aangegeven hoeveel zand er nodig is om aan de toenemende zandvraag van de Waddenzee te voldoen. Na optelling van deze hoeveelheden zal volgen hoeveel zand er in de toekomst in het totaal nodig is om de positie van de Nederlandse kustlijn te handhaven. Verder zal in paragraaf 9.3 worden aangegeven wat de consequenties zijn van de verschillende scenario's voor de veiligheid van de duinen als waterkering.

9.2 Hoeveelheden zand benodigd voor de uitvoering van het handhavingsbeleid

9.2.1 Ophoging dwarsprofielen volgens Bruun-benadering

Volgens de Bruun-benadering treedt er bij een bepaalde zeespiegelstijging een kustlijnachteruitgang op. Om deze achteruitgang tegen te gaan dient de gehele Nederlandse kust vanaf de duintop tot een bepaalde dieptelijn opgehoogd te worden. In hoofdstuk 4 is behandeld hoe is bepaald hoeveel zand er daarvoor bij elk scenario nodig is. Hierbij is gebleken dat de aanname over tot welke dieptelijn gesuppleerd moet worden een grote invloed heeft op de totale benodigde hoeveelheid suppletiemateriaal. Het is moeilijk om een goede aanname te doen voor die dieptelijn. In hoofdstuk 4 is als voorbeeld een opvulling tot de NAP -8 m lijn gegeven. Aan deze aanname ligt de gedachte ten grondslag dat het actieve kustprofiel zich tot die dieptelijn uitstrekt. Zeewaarts van deze lijn zouden dan geen veranderingen optreden.

De grens van het actieve profiel wordt echter ook wel eens op de NAP -20 m lijn gelegd. Het verloop van de benodigde hoeveelheden suppletiemateriaal is niet lineair. Dit is in figuur 4.6 geschetst. In figuur 4.6 is te zien dat de benodigde hoeveelheden tot de NAP -12 m lijn geleidelijk toenemen. Wanneer gesuppleerd wordt tot een grotere diepte, dan nemen de hoeveelheden sneller toe. Er zou ook voor kunnen worden gekozen om alleen ter plaatse van de waterlijn te suppleren. Zo blijft de kustlijn ook op zijn plaats; alleen wordt de vooroever niet direct mee opgehoogd. Er is in dat geval sprake van uitgestelde aanleg. Het zand zal dan wel in ieder geval tot de NAP -3 m lijn worden verspreid. Overigens moet er rekening mee worden gehouden dat bij ophoging van het profiel tot de NAP -3 m dieptelijn, de verliezen hoe dan ook groot zullen zijn. In tabel 9.1 is voor vier dieptelijnen de hoeveelheid zand aangegeven die jaarlijks nodig is om het kustprofiel op te hogen. Bij deze hoeveelheden komt dan nog de hoeveelheid van ongeveer $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ die momenteel jaarlijks gesuppleerd wordt. Uitgaande van deze hoeveelheid bedraagt de procentuele toename van de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand voor bijvoorbeeld het anticiperende scenario voor de

(*10 ⁶ m ³)	NAP-3m	NAP-8m	NAP-12m	NAP-20m
Scenario 1	0,21	0,48	0,71	2,03
Scenario 2	0,62	1,45	2,13	6,08
Scenario 3	0,89	2,06	3,03	8,62

Tabel 9.1 Hoeveelheden jaarlijks te suppleren ter voorkoming kustlijnachteruitgang

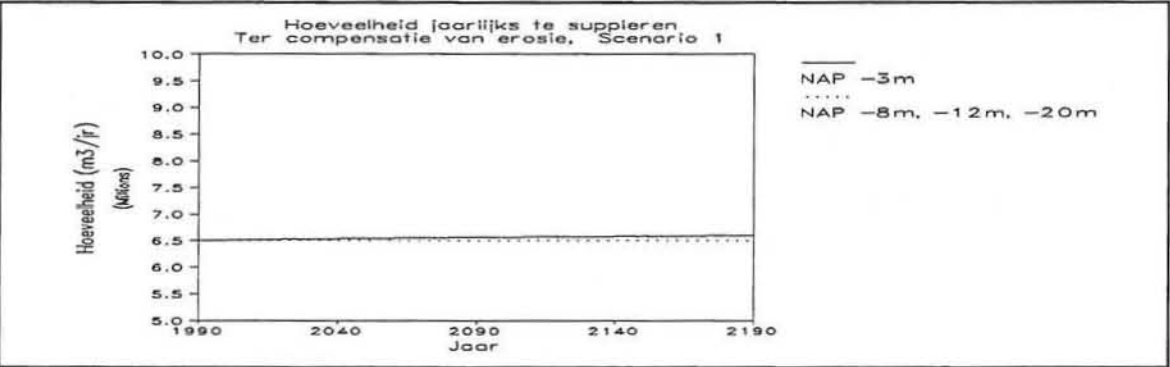


fig 9.1 Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij beleidscenario

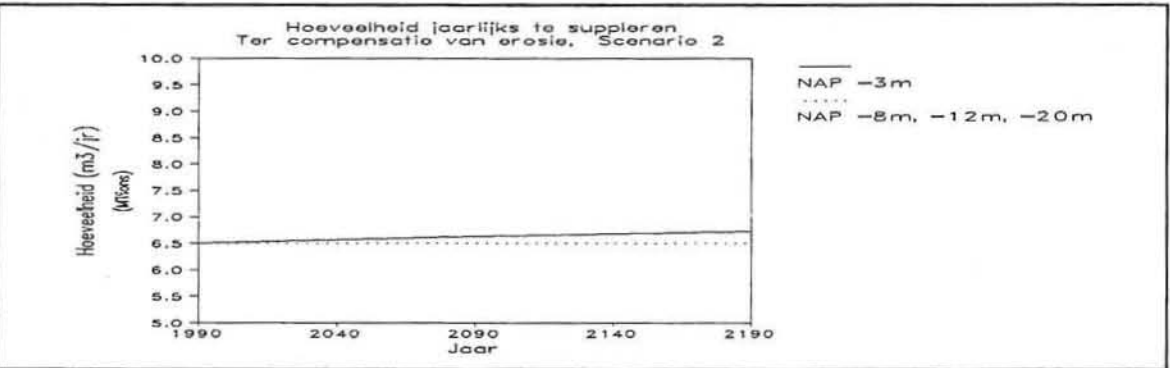


fig 9.2 Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij anticiperend scenario

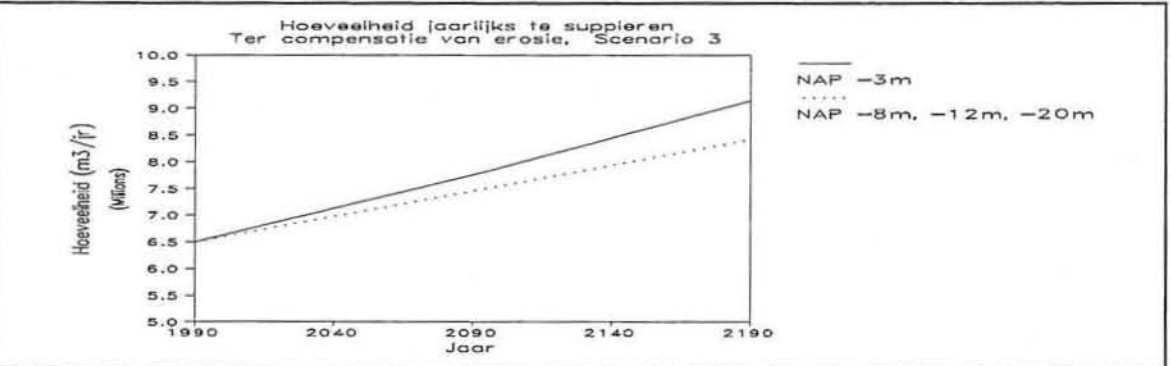


fig 9.3 Hoeveelheden jaarlijks te suppleren om erosie te bestrijden bij ongunstig scenario

NAP -3 m lijn 10 %, voor de NAP -8 m lijn 22 %, voor de NAP -12 m lijn 33 % en voor de NAP -20 m lijn 94 %. Deze percentages verlopen lineair met de zeespiegelstijging. Voor het ongunstige scenario worden deze percentages dus : 14 %, 31 %, 47 % en 133 %. Bij het beleidsscenario bedragen de percentages: 3 %, 7 %, 11 % en 31 %. Als er vanuit zou worden gegaan dat ophoging van het dwarsprofiel tot de NAP -12 m lijn in ieder geval voldoende is, dan blijven de toenames dus redelijk binnen de perken. Voor de eenvoud is er bij de berekening van deze percentages geen rekening mee gehouden dat een deel van de $6,5 \cdot 10^6$ m³ die momenteel jaarlijks wordt gesuppleerd, gebruikt wordt om de huidige zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw te compenseren. In paragraaf 4.4 zijn de percentages berekend die gelden wanneer er van uit wordt gegaan dat de hoeveelheden benodigd suppletie materiaal bij een zeespiegelstijging van 0,20 m/eeuw volledig worden gedekt door de $6,5 \cdot 10^6$ m³ die nu al jaarlijks wordt gesuppleerd. De percentages voor de toename van de benodigde hoeveelheden suppletiezand liggen in dat geval dus lager.

Tevens moet worden bedacht dat tenminste een deel van het zand dat in de huidige situatie sedimenteert (zie blz. 32) in mindering kan worden gebracht op de bepaalde hoeveelheden jaarlijks te suppleren zand om de zeespiegelstijging te volgen.

9.2.2 Suppleties ter compensatie van erosie door verandering langstransportgradiënten

In hoofdstuk 7 is aangegeven dat er in de toekomst veranderingen kunnen gaan optreden in de langstransportgradiënten. Hierdoor kan de erosie langs de Nederlandse kust gaan toenemen. Er is gebleken dat onder het beleidsscenario en het anticiperende scenario er niets verandert zolang de kust voldoende wordt opgehoogd. In dat geval verandert er namelijk niets aan de situatie; de diepte van de vooroever blijft hetzelfde, de golfhoogte en -periode veranderen niet en de hoek van inval blijft ook hetzelfde. Alleen wanneer er sprake is van uitgestelde aanleg (ophoging tot de NAP -3 m lijn) treden er volgens de eerste twee scenario's veranderingen op. De langstransporten zullen ten gevolge van uitgestelde aanleg een geringe toename ondergaan van 2 % tot 5 % volgens het anticiperende scenario in het jaar 2190.

Volgens het ongunstige scenario treden er wel veranderingen op in de golfhoogte en -periode en in de hoek van inval. Dus volgens dit scenario treden ook bij volledige ophoging van het dwarsprofiel toenames op in de langstransportgradiënten. Deze toenames bedragen procentueel gezien ongeveer 20 % tot 40 % in het jaar 2190 ten opzichte van de huidige gradiënten. Het optreden van uitgestelde aanleg in dit scenario leidt tot een extra toename van ongeveer 10%.

In hoofdstuk 7 is bepaald in welke mate de langstransportgradiënten kunnen gaan veranderen. Deze veranderingen zullen invloed hebben op de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand om structurele erosie te bestrijden. Uitgaande van een hoeveelheid van ongeveer $6,5 \cdot 10^6$ m³ die momenteel jaarlijks gesuppleerd wordt om de erosie te bestrijden zijn de hoeveelheden bepaald die in de toekomst nodig zullen zijn. Deze hoeveelheden zijn voor de verschillende scenario's in de figuren 9.1, 9.2 en 9.3 weergegeven. De hoeveelheden zijn berekend met het gemiddelde van de percentages die in de tabellen 7.2 en 7.3 zijn gegeven. In hoofdstuk 7 zijn voor de ophoging van de vooroever twee gevallen doorgerekend. In het geval van uitgestelde aanleg is uitgegaan van een ophoging van het dwarsprofiel tot de NAP -3m lijn. Voor het geval waarbij wordt uitgegaan van een volledige ophoging van het dwarsprofiel is de dieptelijn tot waar dient te worden gesuppleerd (nog) niet gedefinieerd. Er kan vanuit worden gegaan dat de ophoging van het profiel volledig is te noemen vanaf ophoging tot de NAP -8 m lijn. Tevens wordt er vanuit gegaan dat het voor de verandering van het langstransport niet

Scenario	ZSS (m/eeuw)	Zandvraag 1990 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2040 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2090 (10 ⁶ m ³ /jaar)	Zandvraag 2190 (10 ⁶ m ³ /jaar)
Beleids- scenario	0,20	14-26 gem. 20,0	12-23 gem. 17,5	10-20 gem. 15,0	10-20 gem. 15,0
Anticiperend scenario	0,60	-	16-28 gem. 22,0	16-27 gem. 21,5	16-27 gem. 21,5
Ongunstig scenario	0,85	-	18-30 gem. 24,0	19-30 gem. 24,5	19-30 gem. 24,5

Tabel 9.2 Totale zandvraag Waddenzee bij de verschillende scenario's

Jaar	2090		2190	
Ophoging kustprofiel	Volledig	Uitgesteld	Volledig	Uitgesteld
Beleidsscenario	1,1	2,3	2,5	5,4
Anticiperend scenario	6,7	10,0	18,3	25,5
Ongunstig scenario	44,6	49,5	107,1	113,2

Tabel 9.3 Toename duinafslag in procenten t.o.v. duinafslag onder huidige stormomstandigheden

Jaar	2090		2190	
Ophoging kustprofiel	Volledig	Uitgesteld	Volledig	Uitgesteld
Beleidsscenario	1,1	2,3	2,5	5,4
Anticiperend scenario	4,3	7,3	13,2	19,2
Ongunstig scenario	7,4	13,1	24,4	31,6

Tabel 9.4 Toename duinafslag in procenten t.o.v. duinafslag onder huidige omstandigheden bij alleen zeespiegelstijging

uitmaakt of er tot de NAP -8 m lijn of tot de NAP -20 m lijn of tot een willekeurige dieptelijn tussen deze twee dieptelijnen wordt gesuppleerd. Dit betekent echter wel dat er, indien er wordt opgehoogd tot een dieptelijn die boven de NAP -8 m grens ligt, rekening moet worden gehouden met het effect van het optreden van uitgestelde aanleg. Concluderend kan gesteld worden dat de langstransportgradiënten volgens het beleidsscenario en het anticiperend scenario niet noemenswaardig toenemen. Volgens het ongunstige scenario neemt de erosie in de loop van de tijd toe tot een maximum toename van ongeveer 30 % in het jaar 2190. Wanneer het kustprofiel niet in zijn geheel wordt opgehoogd, dus bij uitgestelde aanleg, dan bedraagt deze maximale toename ongeveer 40 %.

9.2.3 De situatie in Zeeland en in het Waddengebied

De hoeveelheden zand die in de paragrafen 9.2.1 en 9.2.2 zijn genoemd gelden voor de hele Nederlandse kust, dus ook voor de Zeeuwse kust en de kust van de Waddeneilanden. In hoofdstuk 8 zijn de afwijkende processen die in Zeeland en in het Waddengebied een rol spelen, behandeld. Er is gebleken dat het ook voor de Zeeuwse kust in principe voldoende is wanneer jaarlijks de hoeveelheden zand die in het voorafgaande zijn bepaald, worden gesuppleerd. Hierbij moet wel worden bedacht dat suppleren in een gebied dat door getijdestromen wordt beheerst problemen met zich mee brengt. Doordat getijdegeulen veel zand kunnen afvoeren kan de effectiviteit van een suppletie klein zijn. Plaatselijk zal moeten worden nagegaan of en op welke manier het zand moet worden aangebracht. Verder kan door de zandvraag van de Oosterschelde zand van de aangrenzende kusten verloren gaan. Omdat de stormvloedkering niet meer dan ongeveer $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zand per jaar doorlaat, is de verwachting dat dit effect wel mee zal vallen. Over een eventuele toename van de zandvraag van de Westerschelde valt weinig te zeggen.

Voor het Waddengebied is het niet voldoende om jaarlijks de hoeveelheden zand die in de paragrafen 9.2.1 en 9.2.2 zijn genoemd te suppleren. In tabel 9.2 (zie hoofdstuk 8) is per scenario de zandvraag van de Waddenzee voor de jaren 1990, 2040, 2090 en 2190 gegeven. Indien niet aan de zandvraag wordt voldaan, kan het bestaande ecologische systeem ernstig worden verstoord. De optredende zandhonger zal worden gestild met zand afkomstig van de kust van de Waddeneilanden. Het is dus van belang er voor te zorgen dat het benodigde zand ook op die kust aanwezig is omdat anders de kust zal eroderen. Indien de kust op een "harde" manier wordt vastgelegd, kan niet aan de zandvraag van de Waddenzee worden voldaan. Om de Waddenkust op zijn plaats te houden moeten deze hoeveelheden dus nog worden opgeteld bij de totale hoeveelheden jaarlijks te suppleren zand.

9.2.4 De totale hoeveelheden benodigd om handhavingsbeleid uit te voeren

Om te bepalen hoeveel zand er in totaal nodig is voor de uitvoering van het handhavingsbeleid moeten de hoeveelheden uit tabel 9.1, de hoeveelheden uit de figuren 9.1, 9.2 en 9.3 en de hoeveelheden uit tabel 9.2 worden opgeteld. De hoeveelheden uit tabel 9.1 zijn constant in de tijd. De hoeveelheden benodigd voor de compensatie van de erosie in het jaar 2040 zijn gehaald uit de figuren 9.1, 9.2 en 9.3 door lineair te interpoleren tussen de jaren 1990 en 2090. Na optelling volgen per scenario de totaal benodigde hoeveelheden bij suppleren tot vier verschillende dieptelijnen zoals weergegeven in de figuren 9.4, 9.5 en 9.6. Uit deze grafieken blijkt dat de totale hoeveelheid vooral wordt bepaald door de zandvraag van de Waddenzee. Volgens het eerste scenario neemt de hoeveelheid in de eerste eeuw af.

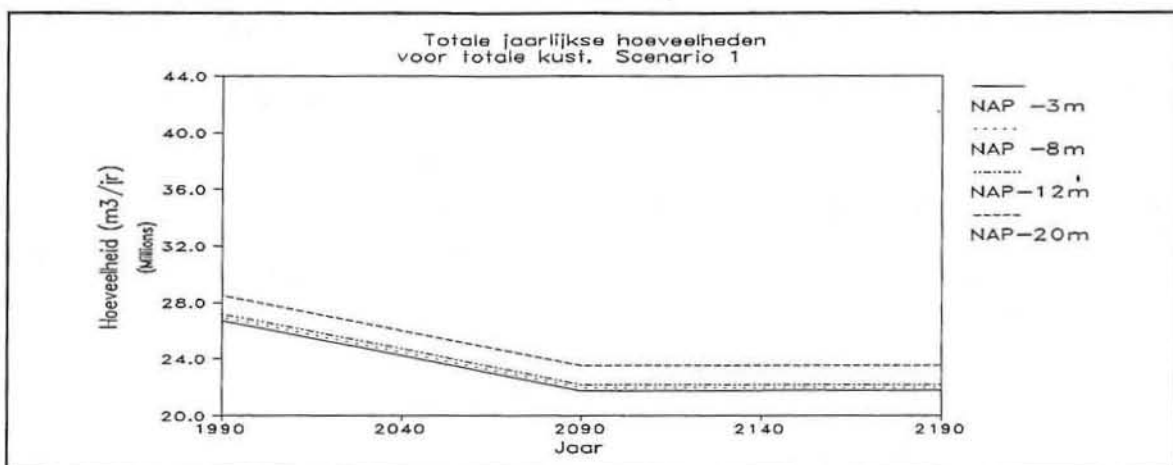


fig 9.4 Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het beleidsscenario

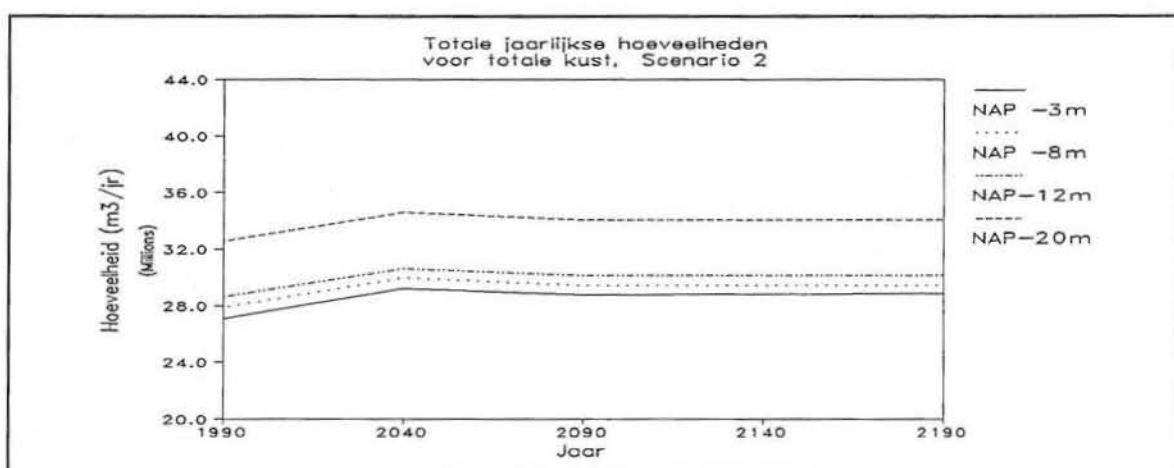


fig 9.5 Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het anticiperende scenario

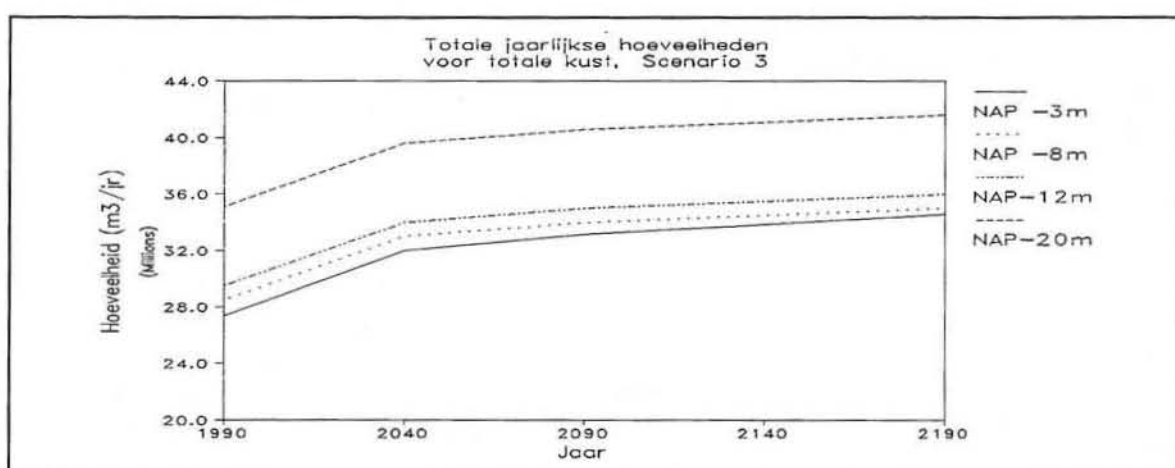


fig 9.6 Totale benodigde hoeveelheid voor uitvoering handhavingsbeleid volgens het ongunstige scenario

Dit gebeurt alleen als de zand- en schelpenwinning in de Waddenzee wordt teruggebracht. Wanneer de hoeveelheden, die in de figuren 9.4, 9.5 en 9.6 worden gegeven, worden vergeleken met de hoeveelheid die momenteel jaarlijkse hoeveelheid wordt gesuppleerd dan blijkt dat er in de toekomst veel meer nodig zal zijn. De toename van de jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand ligt, afhankelijk van het aan te houden scenario en de dieptelijn tot waar het dwarsprofiel gaat worden opgehoogd, tussen de 250 % en 550 % ($22 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ bij beleidsscenario en suppleren tot NAP -3m respectievelijk $42 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ bij ongunstig scenario en suppleren tot NAP -20 m). Wanneer de zandvraag van de Waddenzee niet wordt meegenomen ligt de toename tussen de 3 % en 160 % ($6,7 \cdot 10^6/\text{jr}$ - $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$). Hieruit blijkt nog eens hoe groot de invloed van de Waddenzee is. Uit de grafieken in de figuren 9.4, 9.5 en 9.6 blijkt ook dat suppleren tot de NAP -3 m lijn aantrekkelijk is. Deze uitgestelde aanleg leidt niet tot een dusdanige toename van de langstransportgradiënten dat de besparing voortkomend uit de kleinere hoeveelheden te suppleren zand teniet wordt gedaan door een toename van de erosie. Wel moet rekening worden gehouden met extra verliezen in dwarsrichting. Aan de andere kant is er bij ophoging tot de NAP -8 m lijn niet veel meer zand nodig dan bij ophoging tot de NAP -3 m lijn.

De hoeveelheden zand die jaarlijks moeten worden gesuppleerd, kunnen worden uitgevoerd zowel door middel van strandsuppleties als van vooroeversuppleties. De effectiviteit van strandsuppleties is ongeveer 80 %. De hoeveelheden zand die bepaald zijn moeten derhalve nog met een faktor 1,25 worden vermenigvuldigd. Bij vooroeversuppleties op een diepte van NAP -7 m bedraagt de effectiviteit nog maar 25%. Hierbij moet dus worden vermenigvuldigd met een faktor 4. Deze percentages voor de effectiviteit van suppleties gelden echter voor suppleties die worden uitgevoerd om de verliezen van structureel eroderende kusten te compenseren. Voor suppleties die bedoeld zijn om de zeespiegelstijging te volgen gelden andere effectiviteitsdefinities (zie ook paragraaf 5.2.3).

9.3 De veiligheid van de duinen als waterkering

In paragraaf 9.2 zijn de totale hoeveelheden zand bepaald die nodig zijn om de Nederlandse kustlijn op zijn plaats te houden. Ook wanneer deze hoeveelheden consequent worden gesuppleerd hoeft het niet zo te zijn dat de veiligheid van de duinen als waterkering gewaarborgd blijft. In hoofdstuk 6 is beschreven dat, ook bij volledige ophoging van het kustprofiel, er in de toekomst een toename van de duinafslag zal zijn tijdens stormomstandigheden. Wanneer er daarbij ook sprake is van uitgestelde aanleg dan neemt de duinafslag nog verder toe. Per kustvak zal dus bepaald moeten worden of de duinen opgewassen zijn tegen deze toename. In hoofdstuk 6 is de toename van duinafslag in drie kustvakken bepaald. De gemiddelde toename is per scenario gegeven in tabel 9.3. Uit deze tabel blijkt dat er vooral in het ongunstige scenario rekening moet worden gehouden met een behoorlijke toename van de duinafslag. Het effect van uitgestelde aanleg is aanwezig maar niet erg groot. Tevens is gebleken dat de grote toename in het ongunstige scenario vooral komt door de extra toename van het stormvloedpeil en de toename van de golfhoogte. Er bestaat onzekerheid over het al dan niet optreden van deze veranderingen bij stormomstandigheden. Als alleen wordt gekeken naar het effect van zeespiegelstijging dan is de toename van de duinafslag kleiner. In tabel 9.4 zijn waarden gegeven voor de toename van duinafslag ten gevolge van alleen zeespiegelstijging.

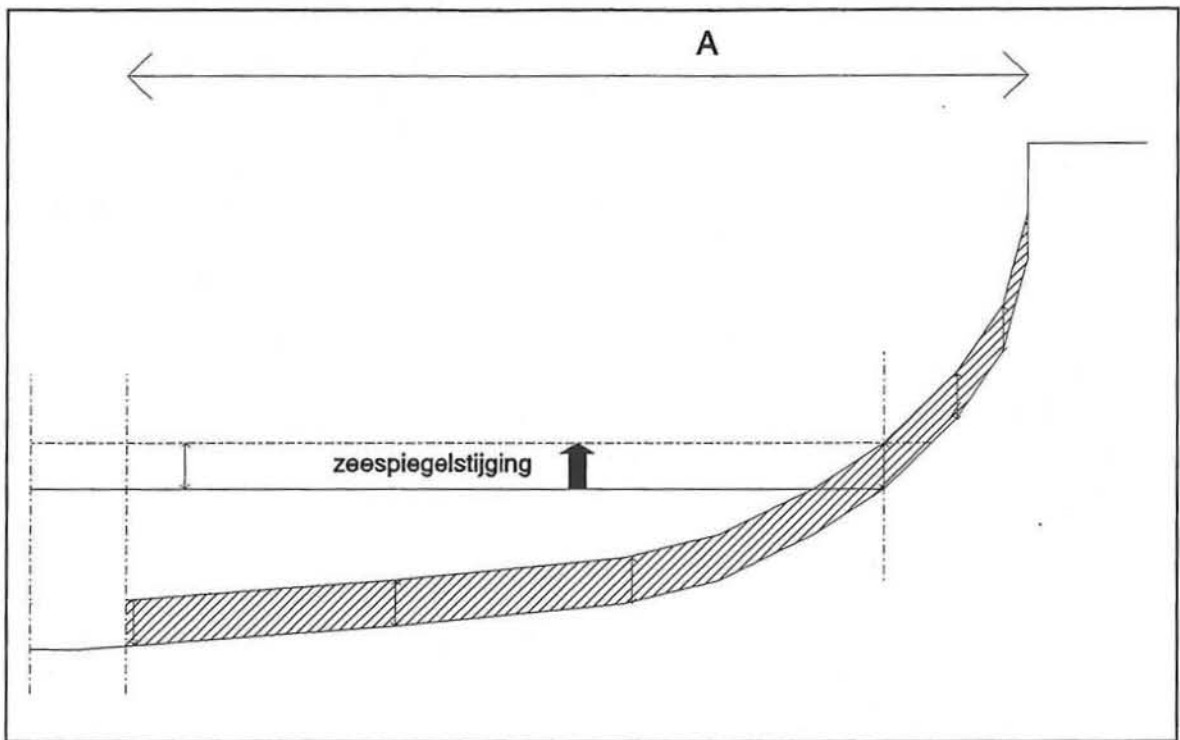


fig 9.7 Ophoging profiel van duintop tot dieptelijn

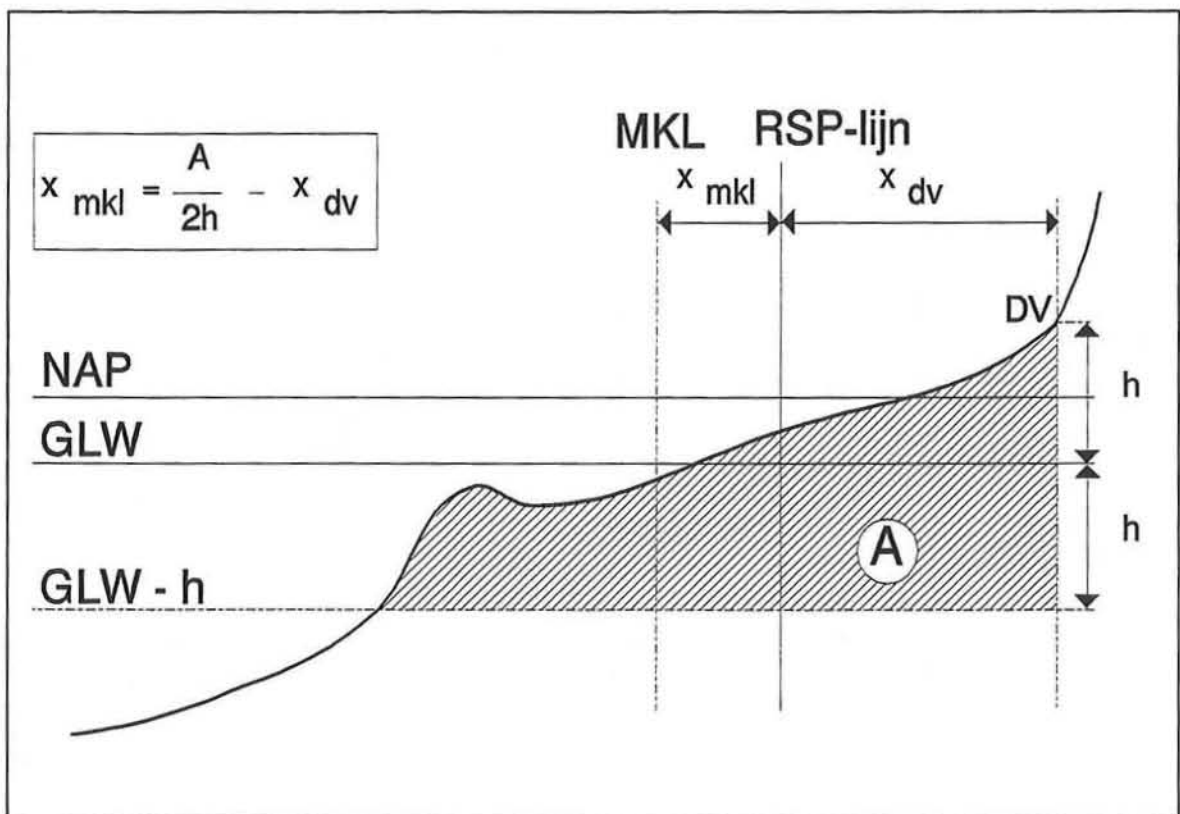


fig 9.8 Berekening van de momentane ligging van de kustlijn

Indien de duinen in een bepaald kustvak niet breed genoeg zijn om de toename van de duinafslag te kunnen weerstaan, zullen aanvullende maatregelen nodig zijn. Het aanwezige duin zou dan bijvoorbeeld landwaarts verbreed kunnen worden. Als dit nodig is, is het zaak tijdig de benodigde ruimte te reserveren om deze verbredingen ook daadwerkelijk uit te kunnen voeren.

De beschouwingen, waaruit de toenamen voor de duinafslag volgen, gelden voor zeerepen die in principe zo breed zijn dat ook de extra afslag ten gevolge van veranderende omstandigheden in de zeereep plaatsvindt. Op plaatsen waar de eerste duinregel smal is, is vaak nog een tweede duinregel aanwezig. Het is duidelijk dat als in het ene geval de zeereep juist stand houdt onder ontwerpomstandigheden, en in een ander geval de zeereep juist doorbreekt en het waterkerende vermogen van de tweede duinregel wordt aangesproken, er geheel andere verhoudingsgetallen resulteren dan in deze studie zijn gevonden.

9.4 Aanpassingen definities van de grenzen van rekenschijf ten behoeve van de bepaling van Basiskustlijn en Momentane kustlijn

In figuur 9.7 is een oorspronkelijk dwarsprofiel en een opgehoogd dwarsprofiel (dat nodig is om de zeespiegelstijging te compenseren) geschetst. De kustlijn ligt in beide gevallen op dezelfde plaats. Als er alleen sprake is van zeespiegelstijging (geen verandering van getijverschil; geen verandering van vorm van dwarsprofiel) zijn de gebruiksmogelijkheden van het opgehoogde profiel gelijk aan de huidige gebruiksmogelijkheden (zelfde natte- en droge strandbreedten).

In figuur 9.8 (uit: Leidraad "Zandige Kust" 1995) is aangegeven hoe volgens de huidige systematiek kustlijnen worden gedefinieerd. De ligging van de momentane kustlijn (MKL) geeft de actuele positie van de kustlijn in een gegeven jaar weer. De ligging van de MKL in een willekeurige (JARKUS-)raai kan voor ieder moment waarop een kustmeting is uitgevoerd, worden bepaald met de methode die in de nota "De Basiskustlijn" is beschreven (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1991). De zandinhoud van een beperkt deel van het dwarsprofiel wordt in rekening gebracht (zie figuur 9.8).

Het is duidelijk dat als er zeespiegelstijging optreedt het niet zo kan zijn dat de thans gedefiniëerde grenzen gehandhaafd kunnen blijven. Die grenzen zullen van tijd tot tijd aangepast moeten worden (verhoogd moeten worden) aan de tot dan toe werkelijk opgetreden zeespiegelstijging.

Het is goed om zich te realiseren wat het betekent als men "achteraf" de gedefiniëerde grenzen voor de berekening van de ligging van de kustlijn aanpast aan de tot dan toe opgetreden zeespiegelstijging. Stel dat er in werkelijkheid een zeespiegelstijging van 0,05 m is opgetreden en er wordt besloten om de ligging van de grenzen met 0,05 m te veranderen ($GLW_{nieuw} = GLW_{oud} + 0,05$ m; $bovangrens_{nieuw} = bovangrens_{oud} + 0,05$ m; $ondergrens_{nieuw} = ondergrens_{oud} + 0,05$ m). Om vervolgens de kustlijn voor en na de verandering op dezelfde plaats te houden is er eenmalig circa $7,5 \cdot 10^6$ m³ zand nodig.

De genoemde hoeveelheid van circa $7,5 \cdot 10^6$ m³ kan worden berekend door de in tabel 4.1 opgegeven jaarlijks benodigde hoeveelheid om een zeespiegelstijging van 0,002 m per jaar te volgen voor de dieptelijn NAP -5 m te vermenigvuldigen met $0,05/0,002 = 25$. De dieptelijn

van NAP -5 m is hierbij aangehouden omdat er van is uitgegaan dat de GLW-lijn op circa NAP -1 m is gelegen. Er wordt dan een laagdikte voor de berekening van de ligging van de kustlijn van 8 m als gemiddelde in rekening gebracht. Bij deze berekening wordt voorbij gegaan aan het feit dat aanvullende suppleties alleen nodig zijn in eroderende kustvakken. De hoeveelheid van 299.600 m³ uit tabel 4.1 geldt voor de ophoging van de hele Nederlandse kust. Deze hoeveelheid zou dus kunnen worden gereduceerd.

Het verdient aanbeveling zich terdege bewust te zijn van deze consequentie. Wellicht dient een beleid te worden uitgestippeld dat een minder schoksgewijs beeld oplevert wat de suppletiebehoeften betreft.

10 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie was te bepalen of het handhavingsbeleid in de toekomst kan worden voortgezet. Daarnaast is nagegaan of de veiligheid van de duinen als waterkering in de toekomst in het geding kan komen. Aan de hand van de onderzoeksvragen zoals gesteld in hoofdstuk 3 zullen de conclusies van deze studie in de volgende paragraaf worden gepresenteerd.

10.1 Conclusies

In het hierna volgende worden enkele algemene conclusies gegeven. De bijbehorende waarden zijn in hoofdstuk 9 (en in de samenvatting) te vinden.

1 *Hoeveel zand is er per tijdseenheid extra nodig om de kust op zijn plaats te houden?*

Het is gebleken dat de hoeveelheden zand die nodig zijn om de kust conform de zeespiegelstijging op te hogen binnen de perken blijven als het probleem alleen met de zogenaamde Bruun-benadering wordt beschouwd.

Verder kunnen veranderingen gaan optreden in de langstransportgradiënten. Die veranderingen kunnen leiden tot een toename van de erosie langs de kust. Deze erosie zal moeten worden gecompenseerd met extra suppleties. De hoeveelheden die hiervoor nodig zijn, zijn ook niet erg groot.

Uit andere studies is echter gebleken dat de hoeveelheden zand die in de toekomst nodig zullen zijn om het ecologische systeem van de Waddenzee te behouden veel groter zullen zijn dan de hoeveelheden die uit de Bruun-benadering volgen. De Waddenzee blijkt dus in hoge mate bepalend te zijn voor de totale hoeveelheid jaarlijks te suppleren zand.

2 *Tot welk scenario kan dat worden bijgehouden? Is er een grens aan te geven waarbij het reëel niet meer haalbaar is het zand kunstmatig aan te voeren?*

De totale hoeveelheid zand die jaarlijks moet worden gesuppleerd, is afhankelijk van het aan te houden scenario en de dieptelijn tot waar het kustprofiel wordt opgehoogd. In deze studie zijn alleen de toename-percentages bepaald van de jaarlijks benodigde hoeveelheden ten opzichte van de $6,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ die momenteel wordt gesuppleerd. Algemeen kan worden gesteld dat de hoeveelheden naar Nederlandse maatstaven binnen de perken blijven. Dit is zeker het geval wanneer de zandvraag van de Waddenzee buiten beschouwing wordt gelaten.

3 *Waar moet het zand worden aangebracht? En waar moet het vandaan komen?*

De bepaalde hoeveelheden zand kunnen zowel als strandsuppleties dan wel als vooroeversuppleties worden uitgevoerd. Voor vooroeversuppleties is echter wel meer zand nodig. Wat de beschikbaarheid van het zand betreft is het zo dat het in toekomst steeds vaker zal voorkomen dat zand van de Noordzeebodem gehaald zal worden. Uit ander onderzoek is gebleken dat het winnen van zand dicht bij de kust ook tot de mogelijkheden behoort.

4 *Hoe snel verlopen de aanpassingsprocessen in dwarsrichting, wanneer er op één plaats wordt gesuppleerd?*

De snelheid van de aanpassingsprocessen in dwarsrichting is in deze studie niet aan bod gekomen. Er kan van worden uitgegaan dat zand gesuppleerd op de vooroever ten opzichte van het tijdsinterval dat in deze studie is bekeken redelijk snel over het dwarsprofiel wordt verspreid. Zand gesuppleerd op het strand wordt naar verwachting nog sneller verspreid.

5 *Zijn er tijdens die aanpassingsprocessen nog kritische tijdstippen aan te wijzen met het oog op duinafslag bij storm?*

In deze studie is het effect van het optreden van uitgestelde aanleg onderzocht. Dit is het meest ongunstige geval dat kan voorkomen waarbij er vanuit wordt gegaan dat zand van beperkte strandsuppleties niet (snel) naar dieper water wordt getransporteerd. Er is gebleken dat de effecten van uitgestelde aanleg niet groot zijn zodat er, als gevolg van een eventuele vertraging van de aanpassing van het kustprofiel, geen problemen zijn te verwachten met betrekking tot de veiligheid.

6 *Welk ruimtebeslag moet nu al worden gereserveerd voor veilige waterkeringen in de toekomst?*

In deze studie is geconstateerd dat, ook wanneer het dwarsprofiel van de gehele Nederlandse kust conform de zeespiegelstijging wordt opgehoogd, de duinafslag tijdens storm omstandigheden in de toekomst zal toenemen. Deze toename is volgens het beleids- en het anticiperende scenario marginaal. In het geval van het ongunstige scenario is wel sprake van een significante toename als gevolg van de aangenomen toenames van het rekenpeil en de golfhoogte. Of het ongunstige scenario ook werkelijk zal optreden valt te betwijfelen. Toch is het zaak de nodige ruimte te reserveren voor eventuele duinverzwaringen zodat ook in het meest ongunstige geval de veiligheid gewaarborgd kan blijven.

10.2 Aanbevelingen

Nader onderzoek naar kustbeleid in Waddenzee

Er is duidelijk naar voren gekomen dat de totale hoeveelheden zand, die in de toekomst nodig zullen zijn voor de uitvoering van het handhavingsbeleid, in belangrijke mate worden bepaald door de zandvraag van de Waddenzee. De vraag rijst of het kustbeleid wat betreft de Waddenkust aangepast dient te worden. Nader onderzoek hiernaar valt dan ook sterk aan te bevelen.

Analyse van de werkelijk optredende veranderingen

Al verscheidene malen is benadrukt dat het optreden van de aangenomen scenario's in twijfel kan worden getrokken. Met name het ongunstige scenario lijkt erg onwaarschijnlijk. De consequenties van de klimaatveranderingen voor het kustbeleid hangen in sterke mate af van het te volgen scenario. Het verdient dan ook aanbeveling de werkelijk optredende veranderingen in de komende decennia nauwkeurig te volgen en aan de hand daarvan te

beslissen welk scenario zal worden gevolgd. Eventueel kunnen de scenario's ook worden bijgesteld.

Onderzoek naar de werking van zandbanken in de Zeeuwse delta

In de huidige situatie worden de extreme golfhoogtes in de kustzone van de Zeeuwse delta gereduceerd door zandbanken voor de kust. Wanneer de zeespiegel gaat stijgen neemt waarschijnlijk de diepte boven de platen toe. Hierdoor wordt het reducerende effect van de zandbanken op de golfhoogte verkleind. Daardoor zou het zo kunnen zijn dat de extreme golfhoogtes hier in het ongunstige geval met meer dan de in deze studie aangenomen 8% toenemen. Dit kan gevolgen hebben voor de veiligheid in dit gebied. Daarom verdient het aanbeveling aanvullende analyses met betrekking tot de toename van duinafslag in dit specifieke kustgebied te maken.

Onderzoek naar de omvang en de effecten van de versteiling van de onderwateroever

Het is duidelijk dat de versteiling van de onderwateroever door de uitvoering van het dynamisch handhavingsbeleid alleen maar zal worden versneld. Hoe groot deze versteiling zal zijn en wat de effecten hiervan zullen zijn op de kust dient nader onderzocht te worden. Dit rapport kan hiertoe een goede aanzet vormen.

11 Literatuurlijst

Hieronder staat een lijst van de literatuur die geraadpleegd is voor deze studie. Niet alle referenties worden in de tekst genoemd.

Bruun, P. (1954)

Coast Erosion and the Development of Beach Profiles:
Journal Memorandum No. 44
US Army, Corps of Engineers
Beach Erosion Board
Washington D.C.

Does, C. van der (1990)

De invloed van zeespiegelstijging op de morfologische ontwikkelingen van laagland-
kusten
Geografisch Instituut
Vakgroep Fysische Geografie
Rijksuniversiteit Utrecht

Graaff, J. van de (1986)

Probabilistic Design of Dunes
An example from the Netherlands
Coastal Engineering, Volume 9
Elsevier Science Publishers B.V.

Intergovernmental Panel on Climate Change (1994)

Preparing to Meet the Coastal Challenges of the 21st Century
Conference report
World Coast Conference 1993
Noordwijk, The Netherlands

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1988)

Handboek zandsuppleties
W.D. Meinema B.V. Uitgave Waltman

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1990)

Kustverdediging na 1990
Verschillende delen van het Technisch Rapport
Uitgave van Rijkswaterstaat

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (DGW) (1990)

Kust in beweging; voorspellen van de veranderingen

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (DWW) (1992)

Slufter en slufterachtige gebieden
Verslag van een discussiedag
Delft

Ministry of Transport, Public Works and Water Management (DGW) (1992)

Analysis of vulnerability to the impacts of sea level rise
A case study for the Netherlands

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (RIKZ) (1993)

Drie jaar kustlijn­zorg
Voortgangsrapportage "dynamisch handhaven"

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (RIKZ) (1994)

Het mysterie van de Wadden
Hoe een getijdesysteem inspeelt op zeespiegelstijging

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (RIKZ/RIZA/DWW) (1994)

Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen
Conceptrapport

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (DGW) (1987)

De Oosterschelde; naar een nieuw onderwaterlandschap
Eindrapport Project Geomeor
Pitman BV, Westhavendijk 152, Goes

Ministry of Transport, Public Works and Water Management (RIKZ) (1993)

Past and future sea level rise in the Netherlands and its impacts
Part of the EPOC project:
Climate change, sea level rise and associated impacts in Europe

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (DGW) (1992)

Kustlijn­zorg, van kustmeting tot zandsuppletie

Plas, A.B.M. van der (1993)

Coastal Zone Management
Challenge for Sustainable Development
Den Haag

Raad voor de Aardwetenschappen (1992)

Zeespiegel-fluctuaties in heden en verleden, meten en mechanismen (Symposium)
Amsterdam

Rijkswaterstaat (1991)

De basiskustlijn
Een technisch/morfologische uitwerking
Nota GWWS-91.006 (RKB 91-19)

Roelse, P. en R. Hillen (1993)

Evaluatie van Zandsuppleties
Een morfologische beschouwing
Interim rapportage
Rapport DGW-93.054

Ruig, J.H.M. de, (RIKZ) (1995)

De kust in breder perspectief
Basisrapport kustnota 1995
RIKZ/95-005

Shore Protection Manual (1984)

Coastal Engineering Research Center
Department of the army
Vicksburg, Mississippi

Steezel, H.J. (1993)

Cross-shore Transport during Storm Surges
Proefschrift Technische Universiteit Delft, Delft Hydraulics
Communications no. 476
Rapport C1-93.05 van de Technische Adviescommissie voor Waterkeringen

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1984)

Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering
Staatsuitgeverij 's Gravenhage

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1995)

Leidraad Zandige Kust

United Nations Environment Programme Government of the Netherlands

Delft Hydraulics/Rijkswaterstaat (1991)

Impact of Sea Level Rise on Society
A case study for the Netherlands

Waterman, R.E. (1990)

Naar een Integraal Kustbeleid via Bouwen met de Natuur
Meinema Delft

Bijlage I Analyse zandsuppleties

Volgens het huidige beleid wordt de Nederlandse kust onderhouden door middel van periodieke zandsuppleties. Onder de huidige omstandigheden is dit beleid goed uit te voeren. De huidige hoeveelheden zijn nog gemakkelijk aan te voeren. Uit het voorafgaande zal duidelijk geworden zijn dat de hoeveelheden zand die in de toekomst nodig zullen zijn (veel) groter worden. Hierdoor rijzen er een aantal vragen zoals:

- 1 Waar moet dat zand vandaan komen? Zijn de bronnen waar het zand nu vandaan komt toereikend of moet er gezocht worden naar andere bronnen?
 - 2 Wat zijn de consequenties voor het (eventuele nieuwe) brongebied?
 - 3 Waar dient het zand gesuppleerd te worden? Er zijn verschillende vormen van suppleren zoals: duinsuppletie, strandsuppletie en vooroeversuppletie. Combinaties van deze verschillende vormen zijn ook mogelijk.
 - 4 Wat zijn de gevolgen voor het milieu en de recreatie bij ieder van de bij vraag drie genoemde suppletievormen?
 - 5 Wat zijn de kosten die aan dit alles verbonden zijn?
-
- Ad1 Momenteel komt ongeveer de helft van het zand dat nodig is voor het kustonderhoud uit werken elders in Nederland, zoals bijvoorbeeld vaargeulonderhoud. Een probleem hierbij is dat het slib dat uit de rivieren komt vaak verontreinigd is. De rest van het benodigde zand wordt tegenwoordig van de Noordzee-bodem gehaald op ongeveer twintig kilometer uit de kust. Misschien is het wel mogelijk om zand dat sedimenteert langs de Nederlandse kust te gebruiken in de erosiegebieden. Momenteel gebeurt dat niet omdat het beleid er op is gericht kustaangroei te bevorderen.
- Ad2 Onderzocht moet worden of het wel haalbaar is om in de toekomst de bodem van de Noordzee te blijven aanspreken voor de benodigde zandsuppleties. Tevens dient nagegaan te worden wat de gevolgen zijn van zandwinning voor de flora en fauna op de Noordzeebodem. De onderwater-flora en fauna zijn geconcentreerd op de ondiepe vooroever. Daarom wordt ook verder op de Noordzee zand gewonnen, zodat er weinig schade optreedt. De schade die optreedt wordt snel hersteld, als het systeem de tijd voor herstel krijgt.
Een ander punt is dat door het creëren van een winput, afhankelijk van de plaats en omvang van de put, de golfrefractie verandert waardoor de golfaanval op de kust verandert.
- Ad3 Er zijn verschillende manieren van suppleren. Een aantal manieren is in figuur I.1 afgebeeld.

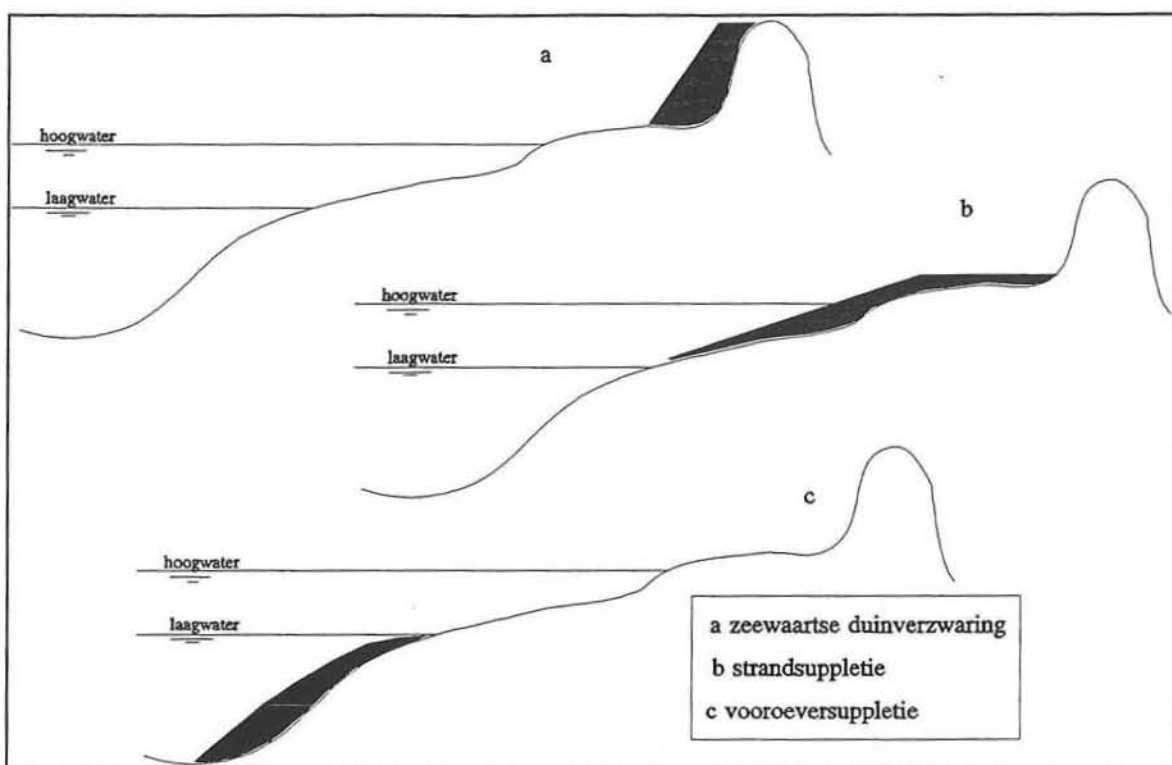


fig I.1 Verschillende suppletietypes

- | | |
|--------------|---|
| a. Voordeel: | Een goed alternatief voor suppleties in de buurt van getijgeulen. Er wordt een buffer gecreëerd die alleen bij stormen wordt aangesproken, zodat het verlies naar de geul beperkt blijft. |
| Nadelen: | Strandbreedte wordt kleiner, veel hinder voor recreatie. Duinvegetatie gaat verloren. |
| b. Voordeel: | Het resultaat is gelijk zichtbaar. |
| Nadelen: | Zand lijkt voor het publieke oog snel verloren te gaan. Hinder voor recreatie tijdens uitvoering. |
| c. Voordeel: | Makkelijk uit te voeren. |
| | Geen hinder voor recreatie (behalve vertroebeling van het water). |
| Nadelen: | Bij een steil kustprofiel gaat veel zand verloren aan de vooroever. Een regel hierbij is dat de effectiviteit van een suppletie afneemt naarmate de suppletie verder uit de kust plaatsvindt. |
| | Onderwaterflora- en fauna wordt aangetast. |

Ad4 De gevolgen zijn hierboven al gedeeltelijk besproken. Voor de onderwaterflora- en fauna geldt dat de bodemcultuur na suppleren geheel verdwijnt. De ondiepe vooroever heeft een hersteltijd van ongeveer anderhalf jaar. Indien vaker op dezelfde plek moet worden gesuppleerd, heeft dit dus ernstige gevolgen voor het milieu. In de

brandingszone zijn deze gevolgen minder ernstig omdat daar weinig biomassa is.

- Ad5 De kosten van zandsuppleties hangen sterk af van de hoeveelheid zand die gesuppleerd moet worden. In tabel I.1 ("Handboek zandsuppleties" RWS, 1988) is één en ander globaal aangegeven. De genoemde bedragen zijn enigszins gedateerd.

Hoeveelheid (10^6 m^3)	Kosten (gulden/ m^3)
3 à 4	2 à 4
minder dan 1	4 à 6
< 1 met varend transport	8 à 13

Tabel I.1 Kosten per hoeveelheid suppletiemateriaal

Verder hangen de kosten af van de afstand waarover het zand getransporteerd moet worden en van het suppletietype.

Bijlage II Golfgegevens Boei bij IJmuiden

Voor de langtransportberekeningen in hoofdstuk 7 is gebruik gemaakt van de golfgegevens van de boei YM6. Het totale aantal metingen bedraagt 36424 voor alle richtingen. Er is alleen gebruik gemaakt van de richtingen 015° - 045° , 345° - 015° , 315° - 345° , 285° - 315° , 255° - 285° , 225° - 255° , 195° - 225° . Deze richtingen zijn getransformeerd naar de richtingen -90° tot 90° met een stap van 30° . De richting 015° - 045° bijvoorbeeld is op deze manier ingevoerd als -90° . De richting 285° - 315° als 0° . Dit alles is verduidelijkt in figuur II.1.

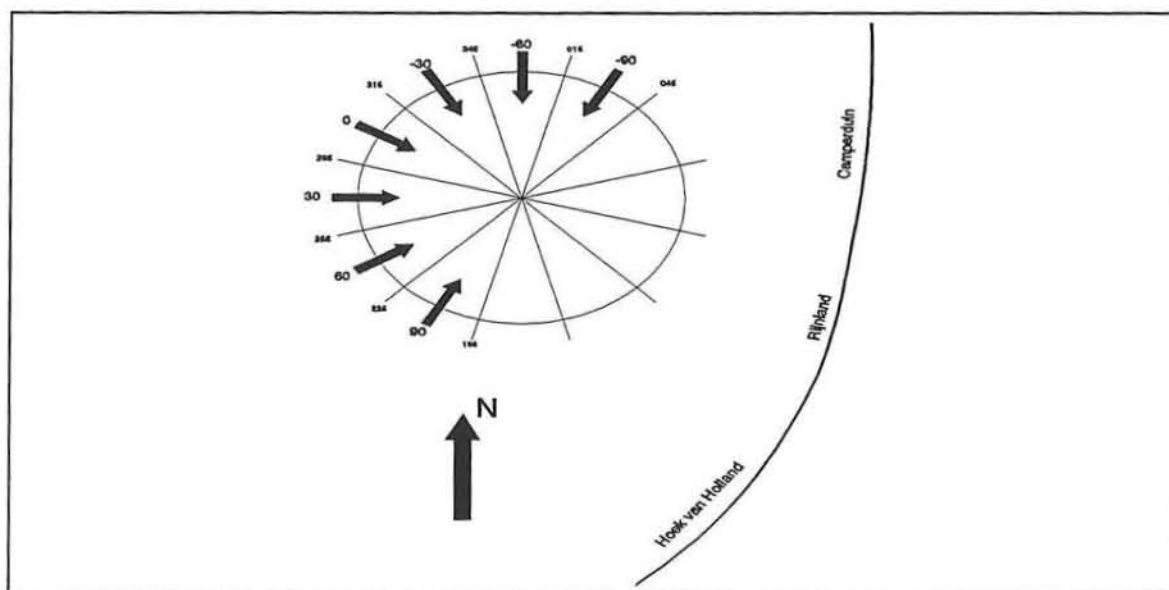


fig II.1 Golfrichtingen en kustoriëntatie

In figuur II.1 is ook te zien dat voor het kustvak Camperduin (3° NNO) de golfrichting -90° niet van invloed is op de kust. De hoek ten opzichte van de kust bedraagt voor die golfrichting namelijk $-90^{\circ} - 27^{\circ} = -117^{\circ}$. Voor het kustvak Rijnland geldt ook dat deze golfrichting niet meewerkt aan het langtransport. Voor het kustvak Delfland (profiel bij Hoek van Holland) valt de golfrichting $+90^{\circ}$ eruit.

Op de volgende bladzijden zijn de golfgegevens per golfrichting gegeven. Per golfklasse is het gemiddelde genomen. Dus bijvoorbeeld voor de golfklasse 150 cm -199 cm is als golfhoogte 1,75 m ingevoerd. Per golfklasse is een percentage van voorkomen gegeven voor de geldende golfrichting. Aan de hand hiervan en aan de hand van het aantal waarnemingen in de geldende golfrichting, kan bepaald worden hoeveel dagen een bepaalde golfhoogte per jaar voorkomt. Bijvoorbeeld: voor de golfrichting 015° - 045° komt 29,503 % van het totaal aantal van 2315 waarnemingen uit de golfklasse van 1,25 m. Dit zijn dus $0,29503 \cdot 2315 = 683$ waarnemingen. Op het totaal van 36424 waarnemingen is dat 1,88 %. Per jaar komen er dus $0,0188 \cdot 365 = 6,8$ dagen voor met golven van 1,25 m hoog uit de richting 015° - 045° (-90°). Voor de bijbehorende golfperiode is een gewogen gemiddelde voor die golfklasse gebruikt. In dit geval is dat 4,57 s. Dit alles is gedaan voor alle golfklassen uit de zeven hoofdrichtingen. Op deze manier is tabel II.1 verkregen.

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 015 - 045

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.648	11.102	.778	.000	.000	12.527	3.80	100.000
50 - 99	.000	.043	26.609	4.276	.043	.000	30.972	4.20	87.473
100 - 149	.000	.000	21.210	8.207	.086	.000	29.503	4.66	56.501
150 - 199	.000	.000	6.393	8.337	.216	.000	14.946	5.10	26.998
200 - 249	.000	.000	.518	5.875	.173	.000	6.566	5.57	12.052
250 - 299	.000	.000	.043	2.981	.130	.000	3.153	5.89	5.486
300 - 349	.000	.000	.000	1.123	.086	.000	1.210	6.40	2.333
350 - 399	.000	.000	.000	.346	.216	.000	.562	6.67	1.123
400 - 449	.000	.000	.000	.216	.259	.000	.475	6.98	.562
450 - 499	.000	.000	.000	.000	.043	.000	.043	7.10	.086
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.043	.000	.043	7.90	.043
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.691	65.875	32.138	1.296	.000	100.000	4.62	100.000
H-gem	.0	35.9	93.2	171.7	296.7	.0	120.7		

aantal waarden in deze sektor = 2315

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 345 - 015

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.864	15.551	.792	.000	.000	17.207	3.84	100.000
50 - 99	.000	.288	23.398	5.904	.000	.000	29.590	4.30	82.793
100 - 149	.000	.000	19.366	7.271	.072	.000	26.710	4.69	53.204
150 - 199	.000	.000	5.976	7.703	.072	.000	13.751	5.13	26.494
200 - 249	.000	.000	.576	5.544	.072	.000	6.192	5.53	12.743
250 - 299	.000	.000	.000	2.448	.000	.000	2.448	6.09	6.551
300 - 349	.000	.000	.000	2.088	.072	.000	2.160	6.28	4.104
350 - 399	.000	.000	.000	.648	.288	.000	.936	6.88	1.944
400 - 449	.000	.000	.000	.072	.360	.000	.432	7.33	1.008
450 - 499	.000	.000	.000	.000	.360	.000	.360	7.62	.576
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.072	.000	.072	7.50	.216
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.072	.000	.072	8.50	.144
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.000	.072	.072	9.00	.072
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	1.152	64.867	32.469	1.440	.072	100.000	4.66	100.000
H-gem	.0	41.5	87.4	171.2	395.5	630.0	118.9		

aantal waarden in deze sektor = 1389

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 315 - 345

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.496	12.788	.409	.000	.000	13.693	3.84	100.000
50 - 99	.000	.088	20.584	4.175	.000	.000	24.847	4.31	86.307
100 - 149	.000	.000	14.102	8.613	.000	.000	22.715	4.80	61.460
150 - 199	.000	.000	4.905	9.401	.029	.000	14.336	5.18	38.745
200 - 249	.000	.000	.350	10.102	.175	.000	10.628	5.61	24.409
250 - 299	.000	.000	.000	6.015	.117	.000	6.131	5.95	13.781
300 - 349	.000	.000	.000	2.978	.380	.000	3.358	6.41	7.650
350 - 399	.000	.000	.000	1.139	.584	.000	1.723	6.79	4.292
400 - 449	.000	.000	.000	.321	.905	.000	1.226	7.25	2.569
450 - 499	.000	.000	.000	.029	.672	.000	.701	7.66	1.343
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.350	.000	.350	8.03	.642
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.175	.000	.175	8.13	.292
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.029	.000	.029	8.70	.117
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.058	.058	9.20	.088
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.029	.029	9.20	.029
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.584	52.730	43.182	3.416	.088	100.000	4.92	100.000
H-gem	.0	38.8	86.8	196.7	415.8	670.7	145.7		

aantal waarden in deze sektor = 3425

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 285 - 315

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.072	9.734	.180	.000	.000	9.986	3.79	100.000
50 - 99	.000	.072	18.139	4.239	.000	.000	22.450	4.34	90.014
100 - 149	.000	.000	14.404	7.399	.036	.000	21.839	4.79	67.565
150 - 199	.000	.000	5.783	10.991	.036	.000	16.810	5.16	45.726
200 - 249	.000	.000	.431	11.171	.000	.000	11.602	5.49	28.915
250 - 299	.000	.000	.000	6.609	.144	.000	6.753	5.90	17.313
300 - 349	.000	.000	.000	4.705	.395	.000	5.101	6.33	10.560
350 - 399	.000	.000	.000	1.940	.467	.000	2.407	6.66	5.460
400 - 449	.000	.000	.000	.575	1.006	.000	1.580	7.03	3.053
450 - 499	.000	.000	.000	.036	.898	.000	.934	7.45	1.473
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.359	.000	.359	7.75	.539
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.144	.000	.144	7.95	.180
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.036	.000	.036	8.90	.036
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.144	48.491	47.845	3.520	.000	100.000	5.01	100.000
H-gem	.0	46.3	93.1	208.0	426.9	.0	159.8		

aantal waarden in deze sektor = 2784

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 255 - 285

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.111	8.118	.334	.000	.000	8.563	3.84	100.000
50 - 99	.000	.000	18.571	3.169	.028	.000	21.768	4.25	91.437
100 - 149	.000	.000	15.652	4.559	.000	.000	20.211	4.63	69.669
150 - 199	.000	.000	8.201	8.535	.111	.000	16.847	5.03	49.458
200 - 249	.000	.000	.667	11.343	.028	.000	12.038	5.41	32.611
250 - 299	.000	.000	.056	7.895	.056	.000	8.007	5.76	20.573
300 - 349	.000	.000	.000	4.448	.139	.000	4.587	6.15	12.566
350 - 399	.000	.000	.000	3.169	.139	.000	3.308	6.48	7.979
400 - 449	.000	.000	.000	1.557	.695	.000	2.252	6.84	4.671
450 - 499	.000	.000	.000	.250	1.029	.000	1.279	7.14	2.419
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.723	.000	.723	7.48	1.140
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.222	.000	.222	7.69	.417
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.195	.000	.195	7.86	.195
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.111	51.265	45.260	3.364	.000	100.000	4.98	100.000
H-gem	.0	33.5	101.3	230.9	461.6	.0	172.0		

aantal waarden in deze sektor = 3597

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 225 - 255

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.361	7.777	.425	.000	.000	8.564	3.78	100.000
50 - 99	.000	.106	22.291	2.890	.021	.000	25.308	4.12	91.436
100 - 149	.000	.000	19.316	3.889	.042	.000	23.247	4.52	66.128
150 - 199	.000	.000	10.646	6.332	.021	.021	17.021	4.87	42.881
200 - 249	.000	.000	2.040	9.584	.042	.000	11.666	5.29	25.861
250 - 299	.000	.000	.000	6.587	.085	.000	6.672	5.72	14.195
300 - 349	.000	.000	.000	4.016	.021	.000	4.037	6.07	7.522
350 - 399	.000	.000	.000	1.742	.085	.000	1.827	6.43	3.485
400 - 449	.000	.000	.000	.701	.234	.000	.935	6.70	1.657
450 - 499	.000	.000	.000	.149	.276	.000	.425	7.13	.722
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.212	.000	.212	7.41	.297
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.042	.000	.042	7.95	.085
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.042
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.042	.000	.042	8.25	.042
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.467	62.070	36.315	1.126	.021	100.000	4.72	100.000
H-gem	.0	42.5	106.0	223.1	426.8	185.0	151.8		

aantal waarden in deze sektor = 4706

STATION : IJmuiden-06 (munitiestortplaats) (YM6)

PERIODE : 1979 - 1991
3-uurlijkse reeksen

WIND-richting sektor : 195 - 225

golfhoogte Hm0 in klassen van 50 cm (vert.)
golfperiode Tm02 in klassen van 2.0 sec (hor.)
frequenties in procenten

	<1,0	1,-2,9	3,-4,9	5,-6,9	7,-8,9	>9,0	alle	T-gem	cum.
0 - 49	.000	.622	8.750	.233	.000	.000	9.605	3.63	100.000
50 - 99	.000	.097	23.333	1.750	.019	.000	25.199	3.97	90.395
100 - 149	.000	.000	20.241	2.353	.058	.019	22.672	4.40	65.195
150 - 199	.000	.000	11.647	5.969	.039	.000	17.655	4.81	42.524
200 - 249	.000	.000	3.014	9.314	.000	.000	12.327	5.21	24.869
250 - 299	.000	.000	.058	6.786	.000	.000	6.844	5.60	12.541
300 - 349	.000	.000	.000	3.403	.039	.000	3.442	6.05	5.697
350 - 399	.000	.000	.000	1.361	.019	.000	1.381	6.29	2.255
400 - 449	.000	.000	.000	.544	.039	.000	.583	6.65	.875
450 - 499	.000	.000	.000	.117	.058	.000	.175	6.90	.292
500 - 549	.000	.000	.000	.000	.078	.000	.078	7.50	.117
550 - 599	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.039
600 - 649	.000	.000	.000	.000	.039	.000	.039	7.90	.039
650 - 699	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 749	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
alle	.000	.719	67.043	31.830	.389	.019	100.000	4.58	100.000
H-gem	.0	39.1	107.8	231.0	370.8	135.0	147.5		

aantal waarden in deze sektor = 5143

Golf hoogte (m)	Golf periode (s)	Hoek van inval (°)	Door (dagen)	Golf hoogte (m)	Golf periode (s)	Hoek van inval (°)	Door (dagen)
0.25	4.02	-90	2.9	4.25	7.27	0	9.4
0.75	4.24	-90	7.2	4.75	7.92	0	0.3
1.25	4.57	-90	6.8	5.25	8	0	0.1
1.75	5.17	-90	3.4	0.25	4.05	30	3.1
2.25	5.89	-90	1.5	0.75	4.3	30	7.8
2.75	6.06	-90	0.7	1.25	4.45	30	7.3
3.25	6.14	-90	0.3	1.75	5.04	30	6.1
3.75	6.77	-90	0.1	2.25	5.89	30	4.5
4.25	7.09	-90	0.1	2.75	6	30	2.9
0.25	3.99	-60	2.4	3.25	6.06	30	1.7
0.75	4.38	-60	4.1	3.75	6.08	30	1.2
1.25	4.56	-60	3.7	4.25	6.62	30	0.8
1.75	5.14	-60	1.9	4.75	7.61	30	0.5
2.25	5.84	-60	0.9	5.25	8	30	0.3
2.75	6	-60	0.3	5.75	8	30	0.1
3.25	6.06	-60	0.3	6.25	8	30	0.1
3.75	6.62	-60	0.1	0.25	4.05	60	4
4.25	7.67	-60	0.1	0.75	4.3	60	10.3
4.75	8	-60	0.1	1.25	4.45	60	9.5
0.25	3.99	-30	4.7	1.75	5.04	60	7.9
0.75	4.33	-30	8.5	2.25	5.89	60	5.7
1.25	4.56	-30	7.8	2.75	6	60	3.8
1.75	5.31	-30	4.9	3.25	6.06	60	2.2
2.25	5.97	-30	3.6	3.75	6.08	60	1.6
2.75	6.04	-30	2.1	4.25	6.62	60	1.1
3.25	6.23	-30	1.2	4.75	7.61	60	0.6
3.75	6.67	-30	0.6	5.25	8	60	0.3
4.25	7.47	-30	0.4	5.75	8	60	0.1
4.75	7.92	-30	0.2	6.25	8	60	0.1
5.25	8	-30	0.1	0.25	3.91	90	5
5.75	8	-30	0.1	0.75	4.13	90	13
0.25	4.02	0	2.8	1.25	4.22	90	11.7
0.75	4.37	0	6.3	1.75	4.69	90	9.1
1.25	4.68	0	6.1	2.25	5.51	90	6.4
1.75	5.31	0	4.7	2.75	5.94	90	6.5
2.25	5.93	0	3.2	3.25	6.02	90	1.8
2.75	6.04	0	1.9	3.75	6.05	90	0.7
3.25	6.15	0	1.4	4.25	6.13	90	0.3
3.75	6.39	0	0.7	4.75	6.66	90	0.1

Tabel II.1 Invoerwaarden voor de golfgegevens

III Coëfficiënten zoals gebruikt in UNIBEST

Hieronder staan in de tabellen III.1 en III.2 de coëfficiënten zoals gebruikt in het programma UNIBEST-LT.

Parameter	Transport-formule	Waarde	Eenheid
A	Cerc	0,025	-
D ₅₀	Bijker	200	µm
D ₉₀	Bijker	300	µm
rc	Bijker	0,05	m
rhos	Bijker	2650	kg/m ³
B deep Hsig/h	Bijker	2,0	-
		0,07	-
B sh Hsig/h	Bijker	5,0	-
		0,60	-
fall vel.	Bijker	0,20	m/s

Tabel II.2 Coëfficiënten voor transportvergelijkingen

Wave energy dissipation	Wave breaking	gamma	0,80
		alfac	1,00
	Bottom friction	fw	0
Flow refraction	Key for flow refraction		0
Flow shearstress	Bottom roughness	k-value	0,10

Tabel II.3 Coëfficiënten voor golven en stroming

