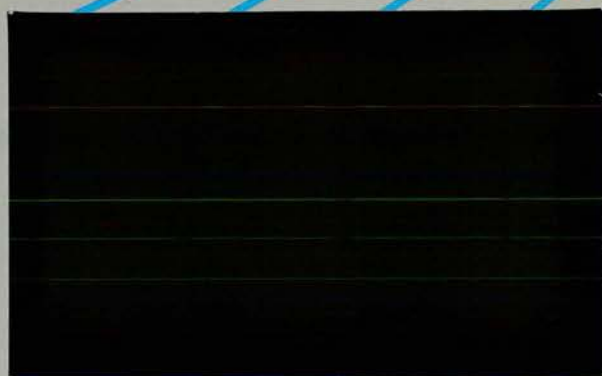


DIGITAL HYDRAULICS

COMPUTER AIDED HYDRAULIC ENGINEERING

DI 164657



Het golfveld langs de Nederlandse
kust bij een zeespiegelrijzing

N. Booij
L.H. Holthuijsen

PROJECT REPORT	DIGITAL HYDRAULICS HOLLAND B.V. Londenseplein 3, 3332 SJ Zwijndrecht, the Netherlands
Project title	Het golfveld langs de Nederlandse kust bij een zeespiegelrijzing
Project description	Bepalen van (a) het belang van een zeespiegelrijzing voor het golfbeeld in een aantal kustvakken van de Nederlandse kust en (b) de onzekerheden in dit golfbeeld t.g.v. onzekerheden in zeespiegelrijzing en daarmee samenhangende omgevingsparameters.
Customer Represented by	Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren Ir. J.G. de Ronde
Project leader work carried out by	Dr. ir. L.H. Holthuijsen Dr.ir. N. Booij Dr.ir. L.H. Holthuijsen
Conclusion	1. De resultaten variëren aanzienlijk over de onderzochte lokaties (Hondsbosse Zeewering, Haringvliet, Waddenzee en Westerschelde). Daarom volgen hier alleen globale conclusies voor het golfbeeld ter plaatse van de NAP waterlijn bij 5 m stormvloedstand. 2. De parameters van het berekende golfveld langs de Nederlandse kust gedragen zich niet lineair als functie van de waterstand. 3. De verandering van de significante golfhoogte langs de Nederlandse kust bedraagt 0.15 - 0.50 m per meter zeespiegelrijzing, 4. Ten gevolge van de onzekerheden in een zeespiegelrijzing en de daarmee samenhangende omgevingsparameters, is de onzekerheid in de significante golfhoogte bij de kust ongeveer 0.30 m 5. De bijdrage van de onzekerheid van de zeespiegelrijzing (incl. bodemstijging) in deze onzekerheid van 0.30 m is tamelijk bescheiden. Die van de daarmee samenhangende omgevingsparameters overheerst (de wind-gedomineerde randvoorwaarden: windsnelheid, windrichting, windopzet, significante golfhoogte, gemiddelde golfperiode en gemiddelde golfrichting op diep water). 6. Soortgelijke conclusies zijn beschikbaar voor de gemiddelde golfperiode, gemiddelde golfrichting en golfrichtingsspreiding.
Status of report Report No.	 Rep. No. 902
City / date	Zwijndrecht, 11 april, 1991

<u>1 Inleiding</u>	1
<u>2 Probleemstelling</u>	2
2.1 Onzekerheden	2
2.2 Gevoeligheden	4
<u>3 Methode en interpretatie</u>	6
3.1 Methode	6
3.2 Interpretatie	8
<u>4 Resultaten Hondsbosse Zeewering</u>	11
4.1 Significante golfhoogte	11
4.2 Gemiddelde golfperiode	15
4.3 Gemiddelde golfrichting	19
4.4 Golfrichtingsspreiding	23
4.5 Conclusies	27
<u>5 Resultaten Haringvliet</u>	28
5.1 Significante golfhoogte	28
5.1.1 Sluis-waterlijn	28
5.1.2 Hoofd-raai	29
5.1.3 Parallel-raai	29
5.2 Gemiddelde golfperiode	38
5.2.1 Sluis-waterlijn	38
5.2.2 Hoofd-raai	39
5.2.3 Parallel-raai	39
5.3 Gemiddelde golfrichting	45
5.3.1 Sluis-waterlijn	45
5.3.2 Hoofd-raai	46
5.3.3 Parallel-raai	46
5.4 Golfrichtingsspreiding	51
5.4.1 Sluis-waterlijn	51
5.4.2 Hoofd-raai	52
5.4.3 Parallel-raai	52
5.5 Conclusies	57
<u>6 Resultaten Afsluitdijk</u>	58
6.1 Significante golfhoogte	58
6.1.1 Oost-raai	58
6.1.2 Midden-raai	60
6.1.3 West-raai	61
6.2 Gemiddelde golfperiode	71
6.2.1 Oost-raai	71
6.2.2 Midden-raai	72
6.2.3 West-raai	73

6.3 Gemiddelde golfrichting	81
6.3.1 Oost-raai	81
6.3.2 Midden-raai	82
6.3.3 West-raai	83
6.4 Golfrichtingsspreiding	89
6.4.1 Oost-raai	89
6.4.2 Midden-raai	90
6.4.3 West-raai	91
6.5 Conclusies	97
7 Resultaten Westerschelde	98
7.1 Significante golfhoogte	98
7.1.1 Hoofd-raai	98
7.1.2 West-raai	99
7.1.3 Oost-raai	101
7.2 Gemiddelde golfperiode	110
7.2.1 Hoofd-raai	110
7.2.2 West-raai	111
7.2.3 Oost-raai	112
7.3 Gemiddelde golfrichting	120
7.3.1 Hoofd-raai	120
7.3.2 West-raai	121
7.3.3 Oost-raai	123
7.4 Golfrichtingsspreiding	130
7.4.1 Hoofd-raai	130
7.4.2 West-raai	131
7.4.3 Oost-raai	133
7.5 Conclusies	140
8 Discussie en conclusies	141
 APPENDIX A	 144
APPENDIX B	148

1 Inleiding

Bij een rijzing van de zeespiegel bestaat de mogelijkheid dat de golfaanval op de Nederlandse kust zal toenemen. De opdrachtgever voor de voorliggende studie (Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren) is met name geïnteresseerd in de mate waarin een zeespiegelrijzing van belang is voor de golfhoogte ter plaatse van de kustverdediging. Echter, de grootte van de zeespiegelrijzing is slecht bekend. Deze onzekerheid beïnvloedt de zekerheid waarmee de golfhoogte langs de Nederlandse kust geschat kan worden bij een zeespiegelrijzing. De vraag van de opdrachtgever is daarom bovendien in welke mate de onzekerheid in de zeespiegelrijzing van belang is voor de onzekerheid in de golfhoogte ter plaatse van de kustverdediging.

Het bovenstaande belang van de zeespiegelrijzing (en de onzekerheid daarin) houdt niet alleen verband met de zeespiegelrijzing als zodanig maar ook met andere omgevingsparameters (zoals bijvoorbeeld de wind). Bovendien is de golfaanval op de kust niet alleen bepaald door de golfhoogte maar ook andere golfparameters zoals de gemiddelde golfperiode en de golfrichting. De vraag van de opdrachtgever betreft daarom meer in het algemeen het belang van een aantal omgevingsparameters voor een aantal golfparameters nabij de kust en de daarbij behorende onzekerheden.

In de voorliggende studie wordt het gestelde probleem onderzocht door een systematische analyse uit te voeren in vier karakteristieke kustvakken (de Hondsbosse Zeewering, de Haringvliet, de Afsluitdijk en de Westerschelde) voor een extreem zware storm met stormvloed. Daartoe wordt het belang van de zeespiegelrijzing (en de andere omgevingsparameters) uitgedrukt

- met behulp van de gevoeligheid van het golfbeeld voor de zeespiegelrijzing (en de andere omgevingsparameters) en
- met behulp van de relatieve bijdrage van de zeespiegelrijzing (en de andere omgevingsparameters) aan de onzekerheid in het golfbeeld bij de kust.

Het rapport is als volgt opgebouwd. De probleemstelling wordt gedetailleerd uiteengezet in hoofdstuk 2. De methode die gebruikt is en de wijze van interpretatie wordt beschreven in hoofdstuk 3. De resultaten voor ieder van de vier kustvakken worden gegeven in de hoofdstukken 4 t/m 7. De conclusies worden per kustvak geformuleerd in de desbetreffende hoofdstukken. Een discussie met enige algemene conclusies worden tenslotte gegeven in hoofdstuk 8.

2 Probleemstelling

2.1 Onzekerheden

Voor een hypothetische situatie met een zeespiegelrijzing (Z) is het goed mogelijk de significante golfhoogte (H_s) te berekenen in een zware storm op een lokatie voor de kust (met behulp van een numeriek golfmodel). Het resultaat zou kunnen zijn:

zeespiegelrijzing Z	0.60 m
significante golfhoogte H_s	1.75 m

Tabel 2.1 Significante golfhoogte bij een gegeven zeespiegelrijzing (voorbeeld).

Nu is het probleem dat de grootte van de zeespiegelrijzing niet met grote zekerheid te voorspellen is. Stel dat de onzekerheid hierin σ_z is (standaardafwijking), dan kan de bijbehorende onzekerheid in de significante golfhoogte σ_{H_s} (standaardafwijking) berekend worden. Het resultaat zou kunnen zijn:

zeespiegelrijzing Z	0.60 m
onzekerheid in zeespiegelrijzing σ_z	0.50 m
significante golfhoogte H_s	1.75 m
onzekerheid in significante golfhoogte σ_{H_s}	0.35 m

Tabel 2.2 Onzekerheid in significante golfhoogte bij een gegeven onzekerheid in zeespiegelrijzing (voorbeeld).

Echter, bij een eventuele zeespiegelrijzing zouden ook andere omgevingsparameters kunnen veranderen die invloed hebben op de significante golfhoogte. Zo zal b.v. de zeebodem van ligging kunnen veranderen (bodemprijzing B). Stel dat deze 80% van de zeespiegelrijzing bedraagt (constant over het hele gebied), dan kan opnieuw de significante golfhoogte berekend worden met de daarbij behorende onzekerheid. Stel dat de uitkomst is:

zeespiegelrijzing Z	0.60 m
onzekerheid in zeespiegelrijzing σ_z	0.50 m
bodemprijzing ($B = 0.8 Z$)	0.48 m
significante golfhoogte H_s	1.35 m
onzekerheid in significante golfhoogte σ_{H_s}	0.25 m

Tabel 2.3 Onzekerheid in significante golfhoogte bij een gegeven zeespiegelrijzing en bodemprijzing (voorbeeld).

Maar ook dit verband tussen bodemprijzing en zeespiegelrijzing is niet goed bekend. Met andere woorden:

de twee grootheden zijn wel gecorreleerd maar het verband is onzeker (b.v. correlatie coefficient $\gamma = 0.7$). De onzekerheid in de voorspelling van de significante golfhoogte wordt hierdoor dus groter. Deze is te berekenen, bijvoorbeeld:

zeespiegelrijzing Z	0.60 m
onzekerheid in zeespiegelrijzing σ_Z	0.50 m
bodemrijzing ($B = 0.8 H_s$)	0.48 m
correlatie $\gamma_{Z,B}$	.7
significante golfhoogte H_s	1.35 m
onzekerheid in significante golfhoogte σ_{H_s}	0.30 m

Tabel 2.4 Onzekerheid in significante golfhoogte bij een gegeven zeespiegelrijzing en gecorreleerde bodemrijzing (voorbeeld).

Ook andere omgevingsparameters zouden kunnen veranderen, waarvan sommige gecorreleerd zijn met de zeespiegelrijzing en andere niet. Deze onzekerheden zullen de onzekerheid in de significante golfhoogte bij de kust verder vergroten.

In deze studie wordt onderzocht wat de invloed is van deze onzekerheden op het golfbeeld in vier kustvakken van de Nederlandse kust (zie onderstaande tabel). In deze tabel zijn de zeespiegelrijzing en de wind aangegeven als primaire omgevingsparameters (in de zin dat ze onafhankelijk zijn van elkaar en van de overige omgevingsparameters). Deze overige (secundaire) omgevingsparameters (bodemrijzing en diepwater golfcondities), zijn gecorreleerd (en dus ten dele afhankelijk) van de primaire omgevingsparameters.

lokaties	omgevingsparameters		golfparameters bij kust
	primair	secundair	
Haringvliet	zeespiegelrijzing		significante golfhoogte
Hondsbosse Zeewering		bodemrijzing	gemiddelde golfperiode
Afsluitdijk	windsnelheid		gemiddelde golfrichting
Westerschelde	windrichting		golfrichtingsspreiding
		windopzet + getij	
		significante golfhoogte (diep water)	
		gemiddelde golfperiode (diep water)	
		gemiddelde golfrichting (diep water)	

Tabel 2.5 Te onderzoeken lokaties, omgevingsparameters en golfparameters.

De voor deze studie gebruikte gemiddelden ($\bar{x}, \bar{y}$), standaardafwijkingen ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ en de voorwaardelijke standaard afwijking σ_y^*) en correlaties (γ_{xy}) zijn gegeven in Tabel 2.6 (voor definities en aanvullende informatie zie Appendix A). Dit zijn passende combinaties, gekozen op basis van indicaties van de opdrachtgever ten aanzien van gewenste waarden van:

- de gemiddelde waarden van de primaire en secundaire parameters,
- de standaardafwijkingen van de primaire parameters en
- de correlatiecoëfficiënt.

Bij de aanvang van deze studie werden de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode als stochastisch gecorreleerde golfparameters beschouwd. Dit impliceert dat de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode onafhankelijk van elkaar gevarieerd werden om de afzonderlijke gevoeligheden te bepalen. Dit blijkt op bezwaren te stuiten. Experimenten met het gebruikte golfmodel (HISWA, zie Appendix B) laten zien dat bij een variatie van (uitsluitend) de significante golfhoogte in diep water (als randvoorwaarde van de golfberekeningen) een negatieve gevoeligheid ontstaat bij de significante golfhoogte bij de kust. Dit lijkt fysisch onrealistisch. De oorzaak hiervan is vermoedelijk de wijze waarop in HISWA de bodemdissipatie gemodelleerd is. Het is om deze reden dat gekozen is de gemiddelde golfperiode niet te behandelen als een onafhankelijk te variëren parameter. In plaats daarvan is de gemiddelde periode in deze studie een konstante factor maal de significante golfhoogte in alle berekeningen. Deze factor is bepaald uit de door de opdrachtgever gewenste gemiddelde waarde van de gemiddelde golfperiode en de gegeven waarden van de gemiddelde significante golfhoogte.

De stormvloedstand is 5 m + NAP.

2.2 Gevoeligheden

In het bovenstaande is de nadruk gelegd op de doorwerking van onzekerheden van omgevingsparameters naar het golfbeeld bij de kust. Daarmee is in feite ook het belang van iedere omgevingsparameter voor het golfbeeld bij de kust vastgelegd. Er is echter een relatie met de gevoeligheid van het golfbeeld voor die omgevingsparameter. Als b.v. de significante golfhoogte ongevoelig is voor de windrichting, dan zal de onzekerheid van de windrichting niet doordringen naar de significante golfhoogte bij de kust. Als er wel sprake is van een gevoeligheid, dan zal die onzekerheid wel doordringen, afhankelijk van de onzekerheid van (in dit voorbeeld) de windrichting. Het is belangrijk dit laatste op te merken omdat soms zelfs een zeer gevoelige omgevingsparameter nauwelijks bijdraagt aan de onzekerheid bij de kust n.l. als de onzekerheid in die omgevingsparameter klein is. De uitkomsten van deze studie in termen van onzekerheden zeggen dus weinig over gevoeligheden voor de omgevingsparameters zelf. Om toch enig inzicht hierin te verkrijgen worden ook de individuele gevoeligheden berekend (van iedere golfparameter bij de kust voor iedere omgevingsparameter).

$y = \alpha x$			eenheden in m, m/s en ($^{\circ}$)					
primair			secundair		afhankelijkheid			
	$\bar{x}$	σ_x	$\bar{y}$	σ_y^*	$\bar{\alpha}$	σ_{α}	γ_{xy}	σ_y
zeespiegelrijzing (x)	.6	.5						
	bodemprijzing (y)		0.3	0.12	.5	.2	.85	.29
windrichting (x)	NW	15						
	golfrichting (y) (diep water)		NW	.0	1.0	.0	1.0	15
windsnelheid (x)	30	3						
	windopzet + getij (y)		5	.5	.1667	.01667	.70	.71
	<u>Haringvliet</u>							
	sign. golfhoogte (y) (diep water) H_s		5.5	.66	.1833	.022	.64	.86
	gem. golfperiode (y) (diep water) $T = 1.56 H_s$		8.6	.0	-	-	-	1.3
	<u>Westerschelde</u>							
	sign. golfhoogte (y) (diep water) H_s		5.5	.66	.1833	.022	.64	.86
	gem. golfperiode (y) (diep water) $T = 1.56 H_s$		8.6	.0	-	-	-	1.3
	<u>Hondsbosse Zeewering</u>							
	sign. golfhoogte (y) (diep water) H_s		6.0	.72	.2	.024	.64	.94
	gem. golfperiode (y) (diep water) $T = 1.52 H_s$		9.1	.0	-	-	-	1.4
	<u>Afsluitdijk (Noordzee)</u>							
	sign. golfhoogte (y) (diep water) H_s		6.5	.78	.2166	.026	.64	1.02
	gem. golfperiode (y) (diep water) $T = 1.48 H_s$		9.6	.0	-	-	-	1.5

Tabel 2.6 Gemiddelden, standaardafwijkingen en correlaties van primaire omgevingsparameters (x) en daarmee gecorreleerde secundaire omgevingsparameters (y).

3 Methode en interpretatie

3.1 Methode

De gevolgde methode is een conventionele meervoudige eerste-orde foutenvoortplanting met behulp van een variatieprincipe voor het bepalen van de voortplanting van invoergegevens door een numeriek golfmodel.

Met het golfmodel (HISWA, Holthuijsen e.a., 1989¹, door de opdrachtgever beschikbaar gesteld) is door de opdrachtgever vrij veel ervaring verkregen in uiteenlopende studies. Het zal daarom niet verder aan de orde gesteld worden (behalve het gedrag van HISWA voor de gegeven situaties). Alle berekeningen in de studie zijn uitgevoerd met de 1989 versie van HISWA met alle coëfficiënten op de defaultwaarde en de opties frekwentie-verandering door breken en bodemwrijving aan. Het software systeem ARCADIA, dat voor de toepassing van het variatie principe is gebruikt, is door Digital Hydraulics ontwikkeld en wordt hier kort toegelicht (zie ook Booij en Holthuijsen, 1988²). Daarbij wordt eerst een vrij eenvoudige situatie geschetst die allengs gecompliceerder wordt.

In de situatie waar alleen de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (σ_Z) doorwerkt in de onzekerheid van de significante golfhoogte σ_{H_s} bij de kust is deze eenvoudig te berekenen als een enkelvoudige eerste-orde foutenvoortplanting (de afhankelijkheid tussen H_s en Z dient in eerste orde lineair te zijn):

$$\sigma_{H_s} = \frac{\partial H_s}{\partial Z} \sigma_Z$$

waar de afgeleide $\partial H_s / \partial Z$ de gevoeligheid is van H_s voor kleine veranderingen in Z .

Als er meer dan één onzekere omgevingsparameter de significante golfhoogte bij de kust beïnvloedt (b.v. de bodemrijzing en de wind), dan is een meervoudige eerste-orde foutenvoortplanting toepasbaar mits deze omgevingsparameters ongecorreleerd zijn:

$$\sigma_{H_s}^2 = \left(\frac{\partial H_s}{\partial Z_1} \right)^2 \sigma_{Z_1}^2 + \left(\frac{\partial H_s}{\partial Z_2} \right)^2 \sigma_{Z_2}^2 + \left(\frac{\partial H_s}{\partial Z_3} \right)^2 \sigma_{Z_3}^2 + \dots$$

waar de afgeleiden $\partial H_s / \partial Z_i$ de gevoeligheden zijn van H_s voor kleine veranderingen in de omgevingsparameter Z_i . De genormeerde bijdrage van iedere omgevingsparameter Z_i aan de onzekerheid in H_s is die bijdrage gedeeld door de totale onzekerheid:

$$\sigma^*(H_s|Z_i)^2 = \left(\frac{\partial H_s}{\partial Z_i} \right)^2 \sigma_{Z_i}^2 / \sigma_{H_s}^2$$

of, om een lineaire maat te gebruiken:

¹ Holthuijsen, L.H., N. Booij en T.H.C. Herbers, 1989, A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, Coastal Engineering, Vol. 13, blz. 23 - 54

² Booij, N. en L.H. Holthuijsen, 1988, The statistical analysis of deterministic model results, Proc. Computer modelling in Ocean Engineering, Schrefler & Zienkiewicz (eds.), Venice, Sept. 19 - 23, 1988, Balkema, Rotterdam, blz. 9 - 15

$$\sigma^*(H_s|Z_i) = \left(\frac{\partial H_s}{\partial Z_i} \right) \sigma_{Z_i} / \sigma_{H_s}$$

Het volgt uit deze definitie dat de som van de kwadraten van de genormeerde bijdragen gelijk is aan 1:

$$\sum_i \{\sigma^*(H_s|Z_i)\}^2 = 1$$

In het bovenstaande is het essentieel dat de omgevingsparameters onafhankelijk van elkaar zijn. Nu wordt in de probleemstelling van deze studie een aantal gecorreleerde (dus afhankelijke) omgevingsparameters genoemd. In de voorliggende studie worden deze in de analyse vervangen door andere, onafhankelijke parameters. Dat gaat als volgt (een formele behandeling wordt gegeven in de Appendix A):

Stel dat de bodemstijging B een gegeven fractie α is van de zeespiegelrijzing Z . De bodemrijzing kan dus geschreven worden als

$$B = \alpha Z$$

De onzekerheid in de bodemstijging bij een gegeven zeespiegelrijzing is gelegen in de onzekerheid van de grootte van de coefficient α (die in deze studie onafhankelijk van Z verondersteld wordt). Op deze wijze kan de gecorreleerde onzekerheid van de bodemstijging B omgezet worden in de ongecorreleerde onzekerheid van α . De relaties tussen deze onzekerheden worden in algemene termen gegeven in de Appendix A. Deze techniek wordt gebruikt voor alle gecorreleerde onzekerheden in deze studie (de windopzet en de diepwater golfrandvoorwaarden).

In deze studie wordt de onzekerheid in de significante golfhoogte H_s bepaald in een gegeven situatie van zeespiegelrijzing. Daartoe berekent HISWA in eerste instantie H_s voor die situatie met gegeven omgevingsparameters Z_i (d.w.z. met HISWA voor een gegeven zeespiegelrijzing, bodemrijzing, wind etc.). Deze situatie wordt de basissituatie genoemd. De waarden van de afgeleiden $\partial H_s / \partial Z_i$ worden vervolgens berekend door

- een kleine verstoring ΔZ_i aan te brengen in ieder van de omgevingsparameters en
- voor ieder van deze verstoringen de bijbehorende verstoring ΔH_s in de significante golfhoogte te berekenen met HISWA (een HISWA berekening voor iedere verstoring ΔZ_i).

De afgeleiden, en dus de gevoeligheden, worden vervolgens geschat als:

$$\frac{\partial H_s}{\partial Z_i} \approx \frac{\Delta H_s}{\Delta Z_i}$$

Door deze te vermenigvuldigen met de verhouding $\sigma_{Z_i} / \sigma_{H_s}$, wordt de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid van de golfparameter H_s verkregen.

De waarde van ΔZ_i dient in het algemeen klein te zijn om het lokale gedrag van het model te bepalen, maar de exacte waarde is niet relevant omdat deze genormeerd wordt met de waarde van ΔH_s (die lokaal lineair met ΔZ_i verondersteld wordt te zijn). In ARCADIA wordt de waarde van ΔZ_i gewoonlijk gekozen als $0.1 \sigma_{Z_i}$.

De bovenstaande techniek wordt niet alleen toegepast op de significante golfhoogte bij de kust maar op alle gevraagde golfparameters nabij de kust (G_j : G_1 = significante golfhoogte, G_2 = gemiddelde golfperiode, G_3 = gemiddelde golfrichting, G_4 = golfrichtingsspreiding).

Ten aanzien van de keuze van de waarde van ΔZ_i dient het volgende opgemerkt te worden. Bij de interpretatie van de ARCADIA resultaten wordt ervan uitgegaan dat het model zich redelijk gedraagt (d.w.z. niet onregelmatig) over een ruim traject van de invoer parameters zoals b.v. de significante golfhoogte op diep water. Dit is de reden waarom de exacte waarde van ΔZ_i in ARCADIA niet belangrijk is. Echter, bij het uitvoeren van deze studie met de voor ARCADIA gebruikelijke waarde $\Delta Z_i = 0.1 \sigma_{Z_i}$, bleek regelmatig een negatieve gevoeligheid op te treden waar een positieve gevoeligheid verwacht werd. Zo bleek hier en daar de significante golfhoogte bij de kust negatief gevoelig te zijn voor de significante golfhoogte op diep water (dit betekent dat naarmate de significante golfhoogte op diep water hoger is, de significante golfhoogte bij de kust lager zou zijn). Daarvoor zijn drie mogelijke oorzaken onderzocht:

- het niet mee laten variëren van de gemiddelde golfperiode als randvoorwaarde, of
- HISWA genereert wellicht numerieke ruis bij kleine wijzigingen in de randvoorwaarden (de aangeleverde versie van HISWA werkte met enkele-precisie getallen (32 bits)), of
- HISWA gedraagt zich wellicht onregelmatig over een ruim bereik van de randvoorwaarden (b.v. binnen de standaardafwijking van die randvoorwaarden).

De eerste oorzaak bleek inderdaad relevant te zijn (zie Appendix B). De berekeningen zijn daarom uitgevoerd met een vast verband tussen de significante golfhoogte op diep water en de gemiddelde golfperiode op diep water (zie Tabel 2.6).

Ten behoeve van het opsporen van de tweede oorzaak is een 64-bits versie van HISWA ontwikkeld. Met experimenten met deze versie is gebleken dat geen waarneembare numerieke ruis optrad.

Ten behoeve van het opsporen van de derde oorzaak is het gedrag van HISWA in de Westerschelde onderzocht. Daaruit blijkt dat HISWA zich onregelmatig gedraagt (zie Appendix B, een toenemend onregelmatig gedrag naarmate de golven de Westerschelde verder binnendringen waarschijnlijk t.g.v. grootschalige refractie-effecten). Dit impliceert dat de waarde van ΔZ_i relatief groot gekozen moet worden om een realistische indruk van de gevoeligheden te krijgen. Gekozen is voor deze studie voor een waarde $\Delta Z_i = 1.0 \sigma_{Z_i}$. De schatting van de gevoeligheid die zo verkregen wordt is dan niet de lokale gevoeligheid maar een gemiddelde gevoeligheid over het traject $\Delta Z_i = 1.0 \sigma_{Z_i}$ van de omgevingsparameter.

3.2 Interpretatie

De resultaten van de analyse betreffen de genormeerde bijdragen van de diverse omgevingsparameters aan de onzekerheid in de golfparameters bij de kust. De omgevingsparameters zijn in eerste instantie (de primaire omgevingsparameters):

- a) de zeespiegelrijzing,
- b) de windsnelheid en
- c) de windrichting.

De onzekerheden in deze primaire omgevingsparameters werken direct door naar de onzekerheden van het golfparameters bij de kust b.v. doordat de wind lokaal golven opwekt. Daarnaast werken ze indirect omdat, zoals boven is aangegeven, de andere (secundaire) omgevingsparameters afhangen van deze primaire omgevingsparameters:

- d) de bodemrijzing afhankelijk van de zeespiegelrijzing,
- e) de windopzet (+ getij) afhankelijk van de windsnelheid,
- f) de significante golfhoogte H_s op diep water afhankelijk van de windsnelheid,
- g) de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ op diep water (afhankelijk van de significante golfhoogte) en
- h) de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ op diep water afhankelijk van de windrichting.

Als een van de primaire omgevingsparameter in de ARCADIA berekeningen wordt gevarieerd om de invloed van zijn onzekerheid te bepalen worden dus automatisch de daarmee samenhangende secundaire omgevingsparameters gevarieerd. Bijvoorbeeld: bij het bepalen van de invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing wordt in de berekening ook de bodemrijzing gevarieerd omdat deze een gegeven fractie is van de zeespiegelrijzing. Zo wordt dus het gezamenlijke effect van zeespiegelrijzing en bodemrijzing berekend (en niet de afzonderlijke bijdragen omdat het geen onafhankelijke parameters zijn). De resultaten t.a.v. de primaire omgevingsparameters worden daarom gepresenteerd als volgt:

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.24
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.76
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.18

Tabel 3.1 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de primaire omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de significante golfhoogte H_s bij de kust (gefingeerde getallen, som van de kwadraten niet noodzakelijk gelijk aan 1).

Echter, zoals hierboven al werd aangegeven, de onzekerheid in een secundaire omgevingsparameter wordt ook bepaald door de onzekerheid in de evenredigheidscoefficient α . De waarde van α is onafhankelijk van de primaire of secundaire omgevingsparameter en hij wordt daarom in ARCADIA afzonderlijk gevarieerd, zodat diens onzekerheid afzonderlijk wordt berekend (dit wordt uitgevoerd voor ieder van de secundaire omgevingsparameters behalve de diepwater gemiddelde golfrichting omdat daarvan de onzekerheid van α gelijk is aan 0). De uiteindelijke presentatie van de onzekerheden is daarom als volgt:

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.24
α - bodemrijzing	-.14
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.76
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.18
α - opzet (incl. getij)	.48
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.28

Tabel 3.2 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de significante golfhoogte H_s bij de kust.

Merk op dat de som van de kwadraten van deze bijdragen in tabel 3.2 gelijk is aan 1 en dat de invloed van $\alpha - H_s$ (diep water) ook die van $\bar{T}$ (diep water) bevat. De coefficient $\alpha - H_s$ (diep water) wordt in de tekst van dit rapport omschreven als "de schatting van de diepwater significante golfhoogte". De andere α 's worden analoog aangeduid. Een negatieve waarde van $\sigma^*(H_s|Z_i)$ betekent dat de waarde van de golfparameter bij de kust (H_s in dit voorbeeld) in waarde afneemt als de waarde van de omgevingsparameter Z_i toeneemt.

In de resultaten zijn naast de boven aangegeven genormeerde bijdragen in de onzekerheden ook de gevoeligheden van de golfparameters voor veranderingen in de omgevingsparameters opgenomen b.v. voor de significante golfhoogte H_s is dit $\partial H_s / \partial Z_i$. De presentatie is als volgt:

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.22
bodemrijzing	-.52
windsnelheid	.11
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.43
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.17

Tabel 3.3 De gevoeligheden van de significante golfhoogte H_s bij de kust

N.B. Merk op dat niet de coëfficiënten α zijn opgenomen in deze tabel maar de fysische omgevingsparameters zelf (zonder onderling gecorreleerd te zijn). Bovendien dient opgemerkt te worden dat de numerieke waarden van de gevoeligheden alleen betekenis hebben als de eenheden van de grootheden in de beschouwing betrokken worden. Daarom is het belangrijk dat de eenheden van HISWA m, s en $^\circ$ zijn. Als b.v. de waarde van $\partial H_s / \partial (\text{bodemrijzing})$ gelijk is aan -.30 dan betekent dit dat de significante golfhoogte bij de kust .30 m afneemt als de bodemrijzing op diep water met 1 m toeneemt.

- Samenvattend:
- De invloed van de primaire omgevingsparameters (zeespiegelrijzing en wind) is direct en indirect van aard (indirect via de secundaire omgevingsparameters: bodemrijzing, windopzet en diepwater golfrandvoorwaarden). Daarom bevat de bijdrage van een primaire omgevingsparameter ook de invloed van een of meer secundaire omgevingsparameters.
 - Dit impliceert dat de bijdrage van een secundaire omgevingsparameter voor een deel is opgenomen in de bijdrage van de primaire omgevingsparameters. Het overige deel wordt weergegeven door de bijdrage van de evenredigheidscoëfficiënt α .
 - In aanvulling op de onzekerheden worden de gevoeligheden van de golfparameters bij de kust gegeven. De interpretatie daarvan dient rekening te houden met de eenheden van de betreffende grootheden in HISWA (m, m/s en $^\circ$).
 - De resultaten van deze studie hebben betrekking op een relatief grote variatie van de omgevingsparameters (één standaard afwijking).
 - Omdat de standaardafwijking van ieder van de waterstandparameters (zeespiegelrijzing + bodemrijzing + windopzet) niet gelijk zijn aan elkaar, zijn ook de gevoeligheden onderling verschillend (bij een lineair gedrag van HISWA zou dit wel het geval zijn).

4 Resultaten Hondsbosse Zeewering

De situatie voor de Hondsbosse Zeewering is, gezien de bodemtopografie behandeld als een 1-dimensionale situatie, zodat volstaan kan worden met dieptegegevens in een raai loodrecht op de kust (ter plaatse van het midden van de dijk, Fig. 4.1). Het ruimtelijk oplossend vermogen van de bodemtopografie is 50 m en van de berekeningen 10 m. Voor de waarden van de omgevingsparameters (zeespiegelrijzing etc.) wordt verwezen naar Tabel 2.6.

4.1 Significante golfhoogte

In de basissituatie (Fig. 4.2) neemt de significante golfhoogte H_s langs de raai af van 6 m in diep water tot 3.39 m aan de teen van de dijk (de waterlijn op N.A.P. ; in deze basissituatie met een stormvloed bedraagt de waterdiepte ter plaatse 5 m). De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aan de teen van de dijk bedraagt .45 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De ARCADIA analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.24
α - bodemrijzing	-.14
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.76
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.18
α - windopzet (incl. getij)	.48
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.28

Tabel 4.1 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de significante golfhoogte H_s bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

De onzekerheid in de significante golfhoogte aan de teen van de dijk wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij). Hij is enigermate beïnvloed door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai neemt geleidelijk af van 0.89 m in diep water tot 0.45 aan de teen van de dijk (Fig. 4.2). De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in de onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 4.3. Het meest opvallende is de blijvende dominantie van de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de belangrijke afname van het belang van de onzekerheid in de schatting van de diepwater

significante golfhoogte (incl. $\bar{T}$, diep water) naar de kust toe. De invloed van de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is matig.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.22
bodemrijzing	-.52
windsnelheid	.11
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
opzet (incl. getij)	.43
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.17

Tabel 4.2 De gevoeligheden van de significante golfhoogte H_s bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

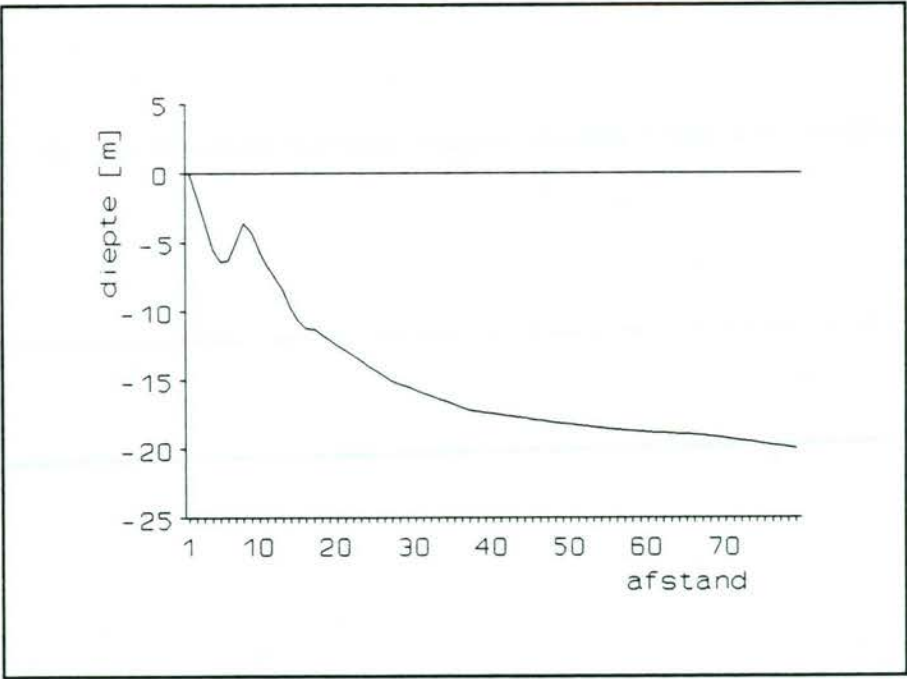


Fig. 4.1 Het verloop van de waterdiepte langs de raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering (t.o.v. NAP). Horizontaal is uitgezet de afstand (aantal gridpunten) uit de kust vanaf de waterlijn aan de teen van de dijk, verticaal is uitgezet de diepte in m.

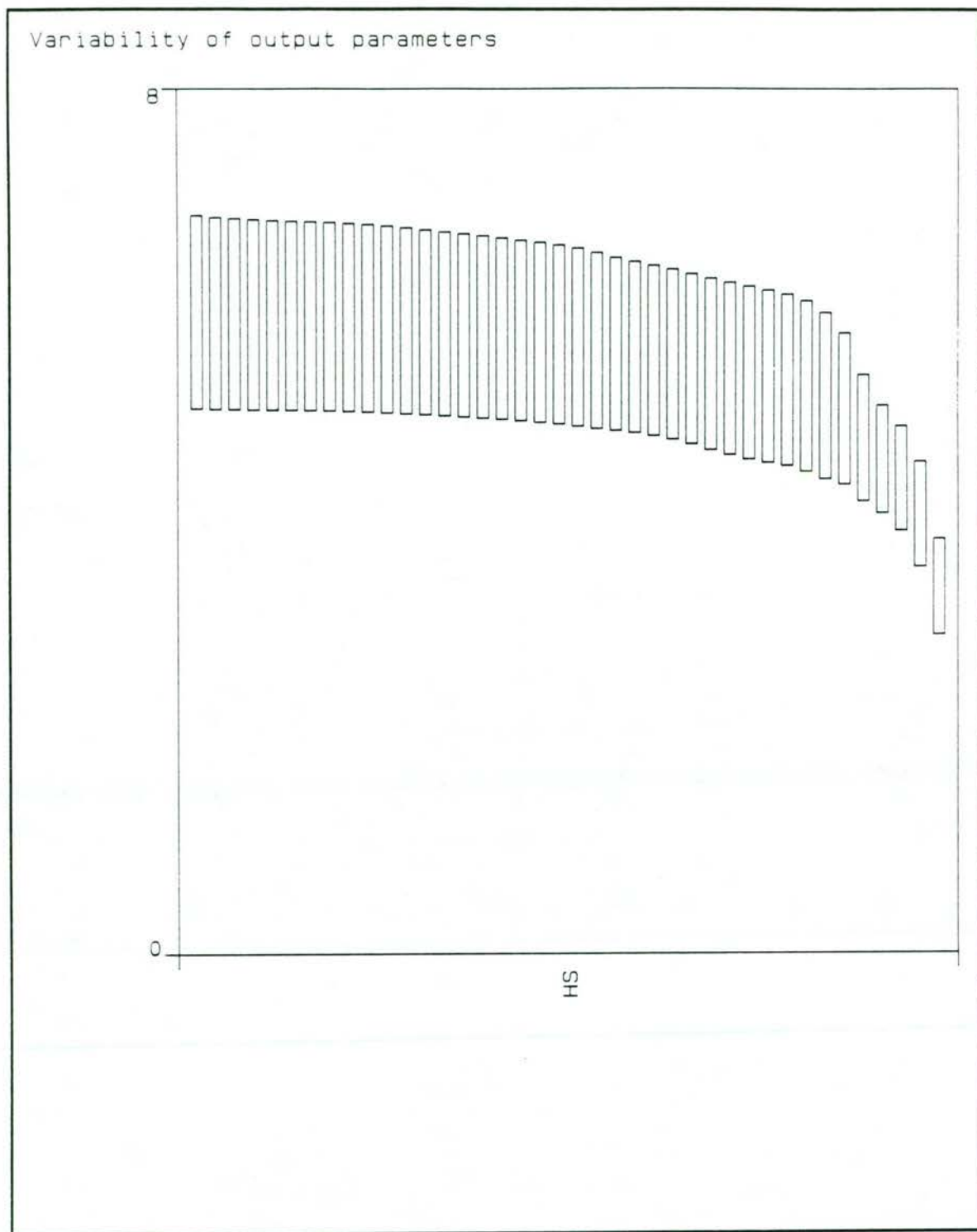


Fig. 4.2 Het verloop van de significante golfhoogte en de totale onzekerheid langs de raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt t.o.v. de kust (zie Fig. 4.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

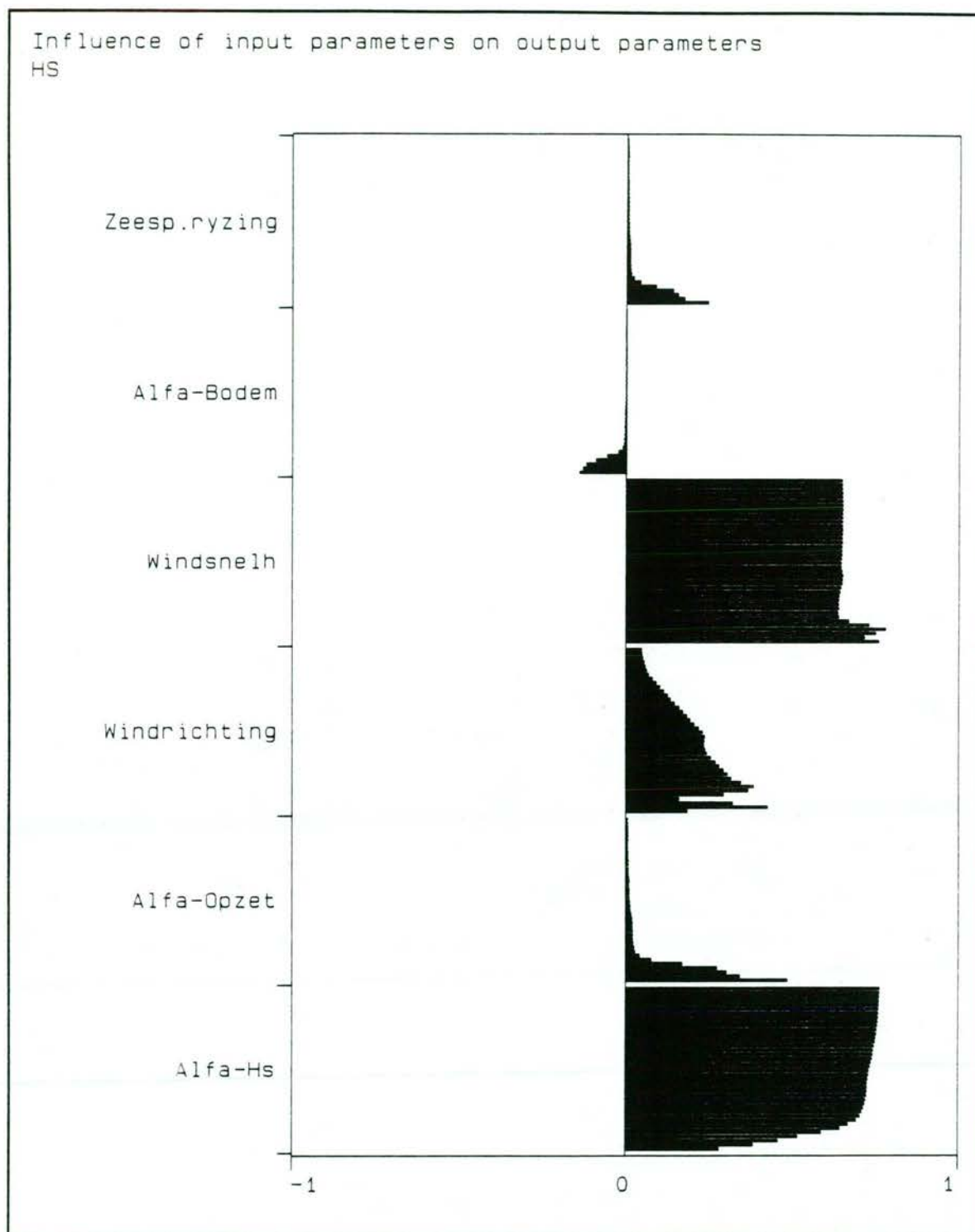


Fig. 4.3 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs een raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Per omgevingsparameter is uitgezet:
horizontaal : van de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 4.1; waterlijn op NAP aan onderzijde van iedere figuur).

4.2 Gemiddelde golfperiode

In de basissituatie (Fig. 4.4) neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ langs de raai af van 9.1 s in diep water tot 7.5 s aan de teen van de dijk. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aan de teen van de dijk bedraagt .7 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De ARCADIA analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.11
α - bodemrijzing	-.01
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.75
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.14
α - windopzet (incl. getij)	.23
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.59

Tabel 4.3 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

De onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aan de teen van de dijk wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en door de onzekerheid van de schatting van significante golfhoogte (diep water). Hij wordt vrijwel niet bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai neemt langzaam af van 1.4 s in diep water tot .7 s aan de teen van de dijk (Fig. 4.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in ieder van de onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 4.5. Het meest opvallende is de blijvende dominantie van de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en van de onzekerheid in de schatting van de diepwater significante golfhoogte (incl. $\bar{T}$, diep water).

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.16
bodemrijzing	-.05
windsnelheid	.17
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.01
opzet (incl. getij)	.32
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.57

Tabel 4.4 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

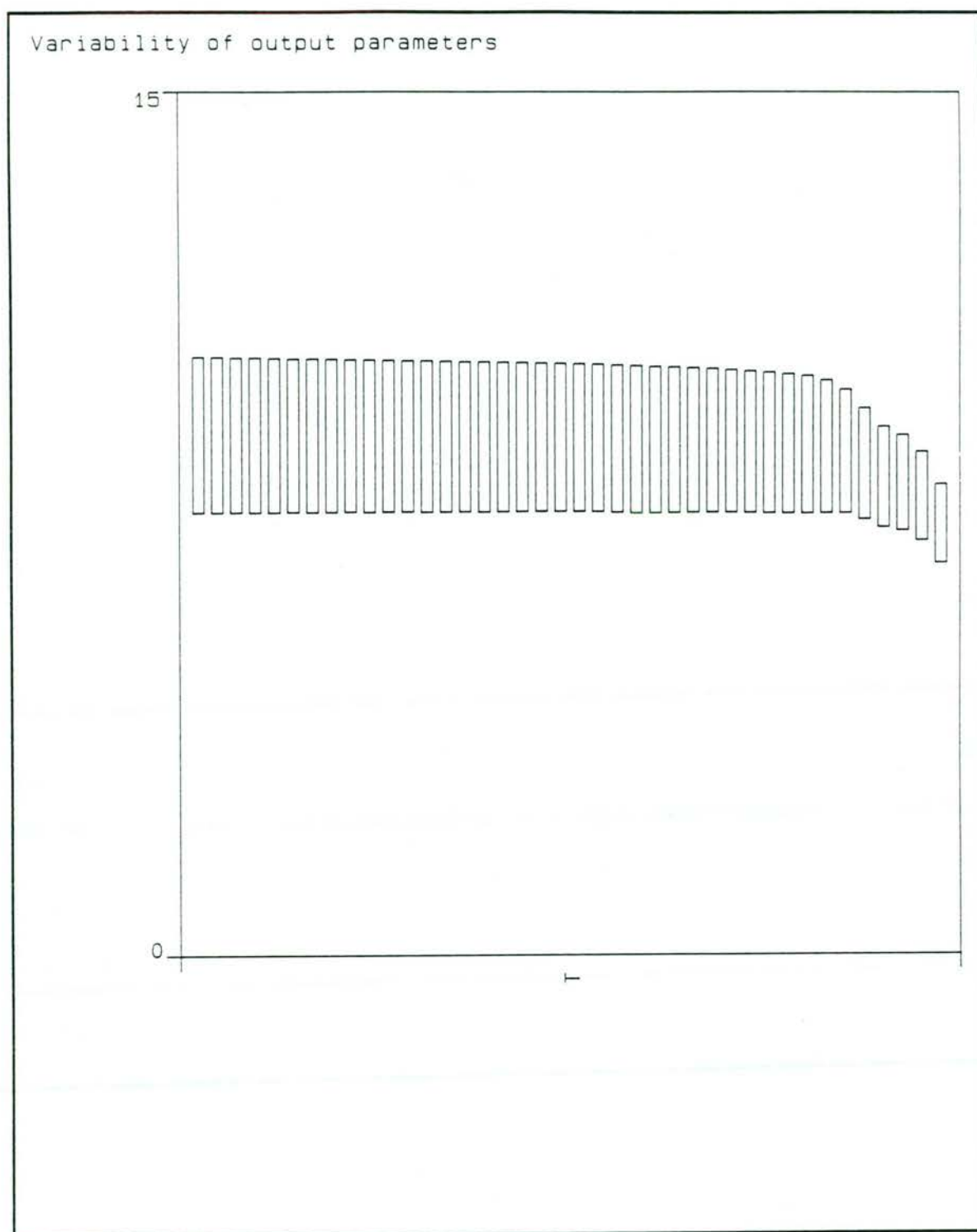


Fig. 4.4 Het verloop van de gemiddelde golfperiode en de totale onzekerheid langs de raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt t.o.v. de kust (zie Fig. 4.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in s).

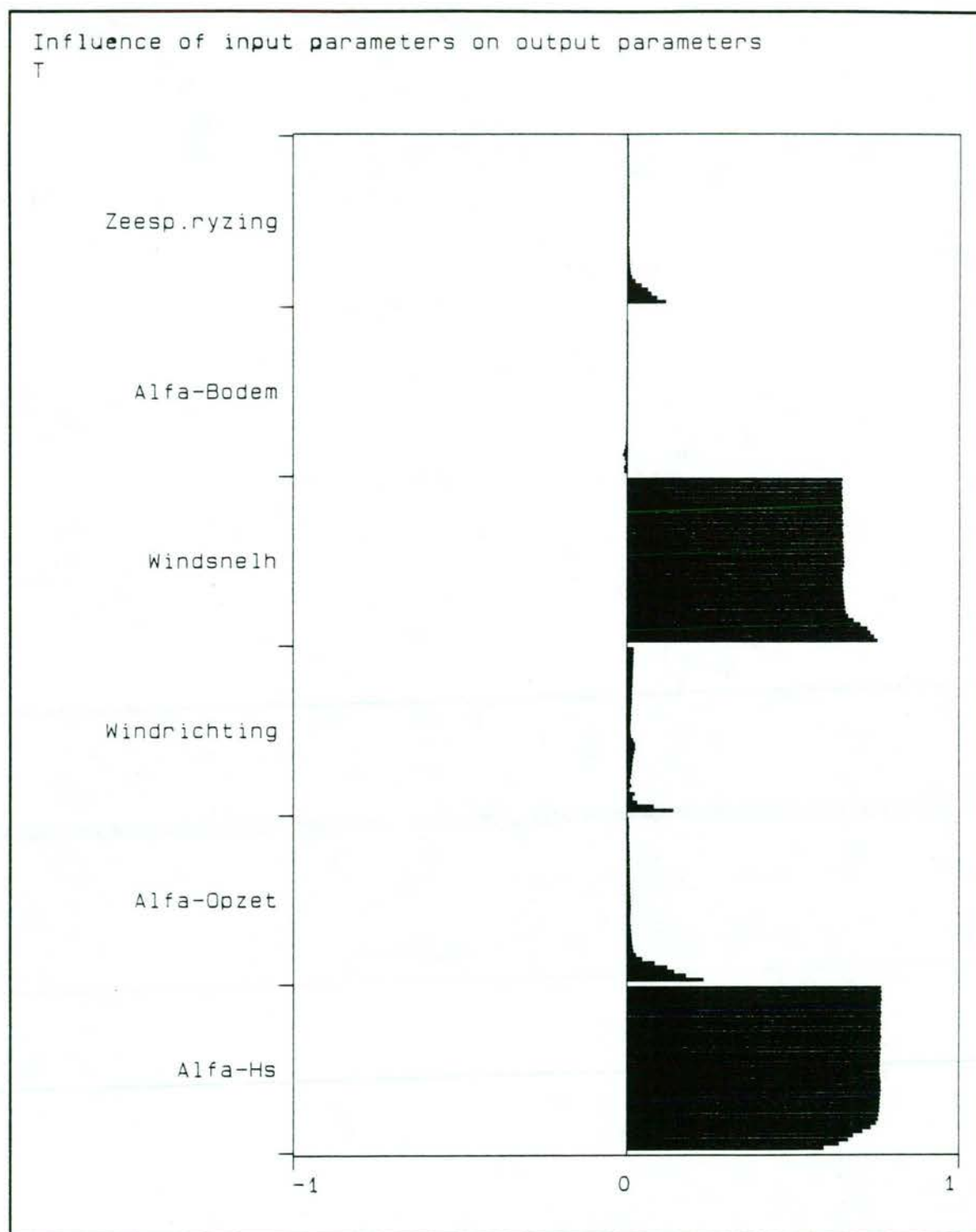


Fig. 4.5 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs een raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Per omgevingsparameter is uitgezet: horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 4.1; waterlijn op NAP aan onderzijde van iedere figuur).

4.3 Gemiddelde golfrichting

In de basissituatie (Fig. 4.6) draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ langs de raai van NW ($\bar{\theta} = 315^\circ$, nautische conventie) in diep water naar WNW ($\bar{\theta} = 290^\circ$) aan de teen van de dijk. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aan de teen van de dijk bedraagt 7° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De ARCADIA analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.03
α - bodemrijzing	.08
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.01
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.99
α - windopzet (incl. getij)	-.07
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.09

Tabel 4.5 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

Het is duidelijk uit deze tabel dat de onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aan de teen van de dijk volledig gedomineerd wordt de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai neemt geleidelijk af van 15° in diep water tot 7° aan de teen van de dijk (Fig. 4.6).

De dominantie van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) blijft gehandhaafd in dieper water (Fig. 4.7).

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.52
bodemrijzing	4.75
windsnelheid	.03
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.48
opzet (incl. getij)	-1.02
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.90

Tabel 4.6 De gevoelheden van de gemiddelde golfrichting bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

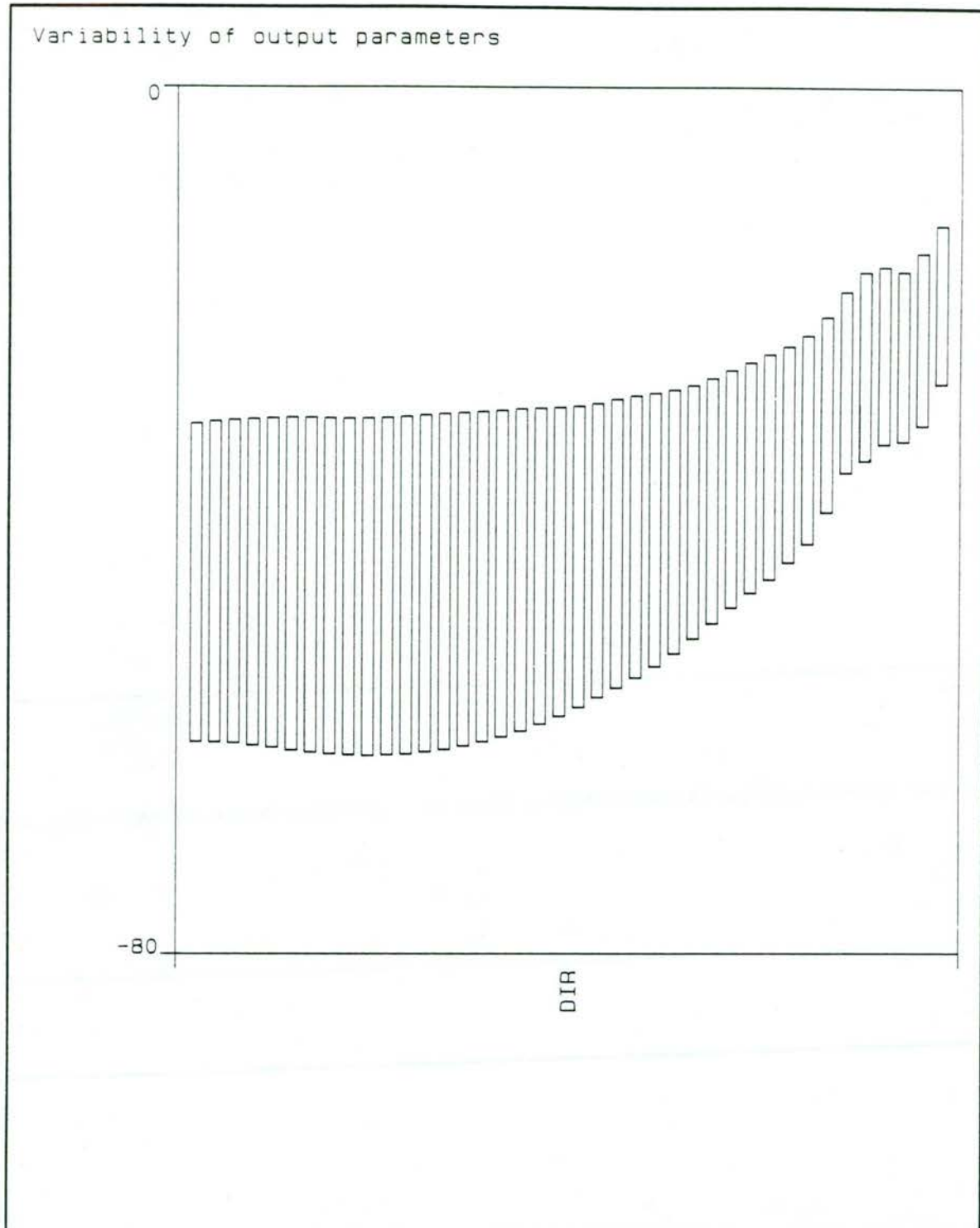


Fig. 4.6 Het verloop van de gemiddelde golfrichting (Cartesische conventie van HISWA) en de totale onzekerheid langs de raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt t.o.v. de kust (zie Fig. 4.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

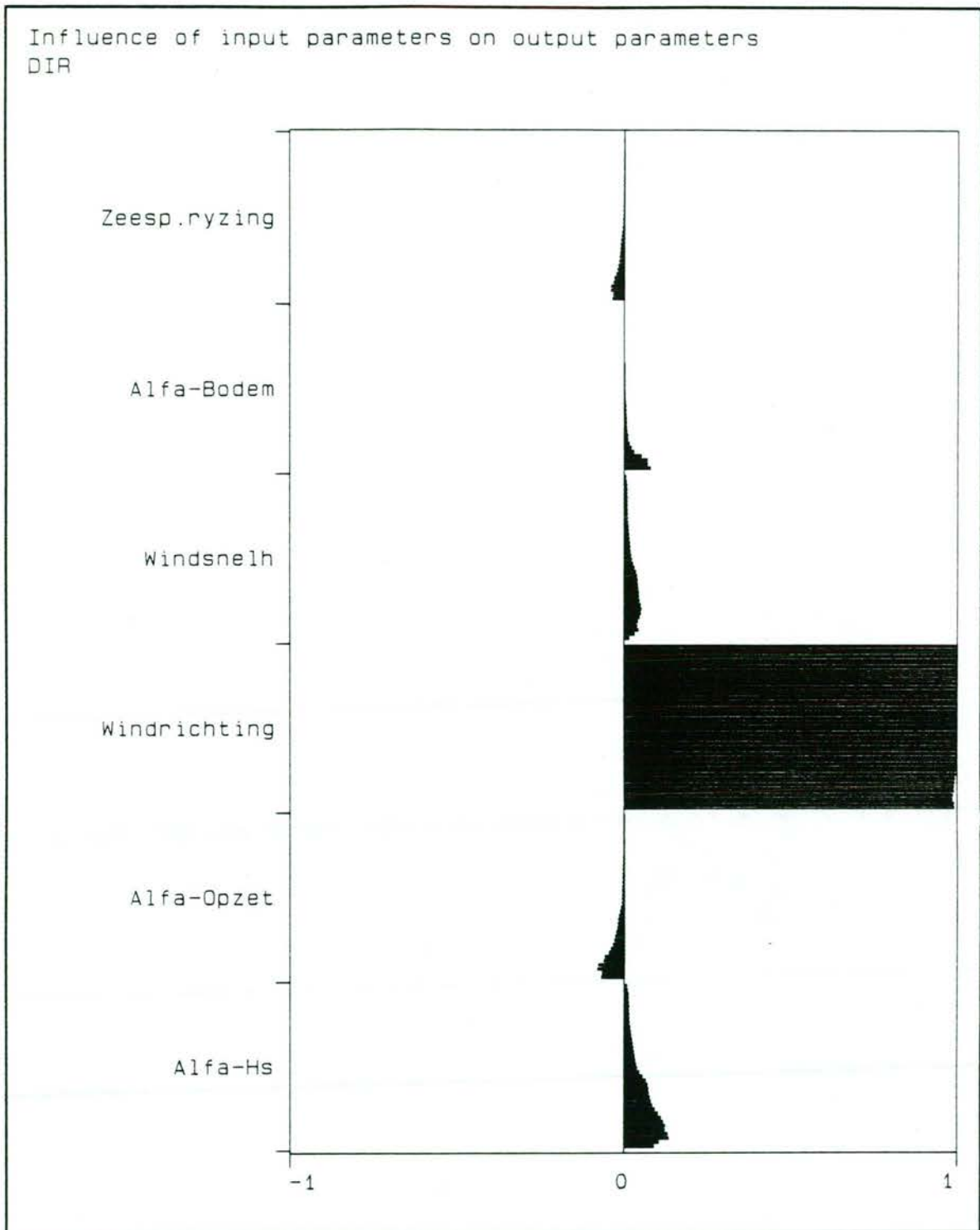


Fig. 4.7 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs een raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 4.1; waterlijn op NAP aan onderzijde van iedere figuur).

4.4 Golfrichtingsspreiding

In de basissituatie (Fig. 4.8) neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ langs de raai af van 29° in diep water tot 15° aan de teen van de dijk. De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aan de teen van de dijk bedraagt slechts 0.6° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De ARCADIA analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.16
α - bodemrijzing	-.30
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.12
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.73
α - windopzet (incl. getij)	.30
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.48

Tabel 4.7 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding σ_θ bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

Het is duidelijk uit deze tabel dat de onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aan de teen van de dijk gedomineerd wordt de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is klein.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai blijft zeer klein (neemt geleidelijk toe van diep water naar de teen van de dijk (Fig. 4.8).

Deze geringe onzekerheid is waarschijnlijk de oorzaak van het enigszins onregelmatige gedrag van de invloed van de onzekerheden in de omgevingsparameters in dieper water (Fig. 4.9), waar overigens de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) dominant blijft.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ teen v.d. dijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.18
bodemrijzing	-1.42
windsnelheid	-.02
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.03
opzet (incl. getij)	.34
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.37

Tabel 4.8 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding bij de teen van de Hondsbosse Zeewering.

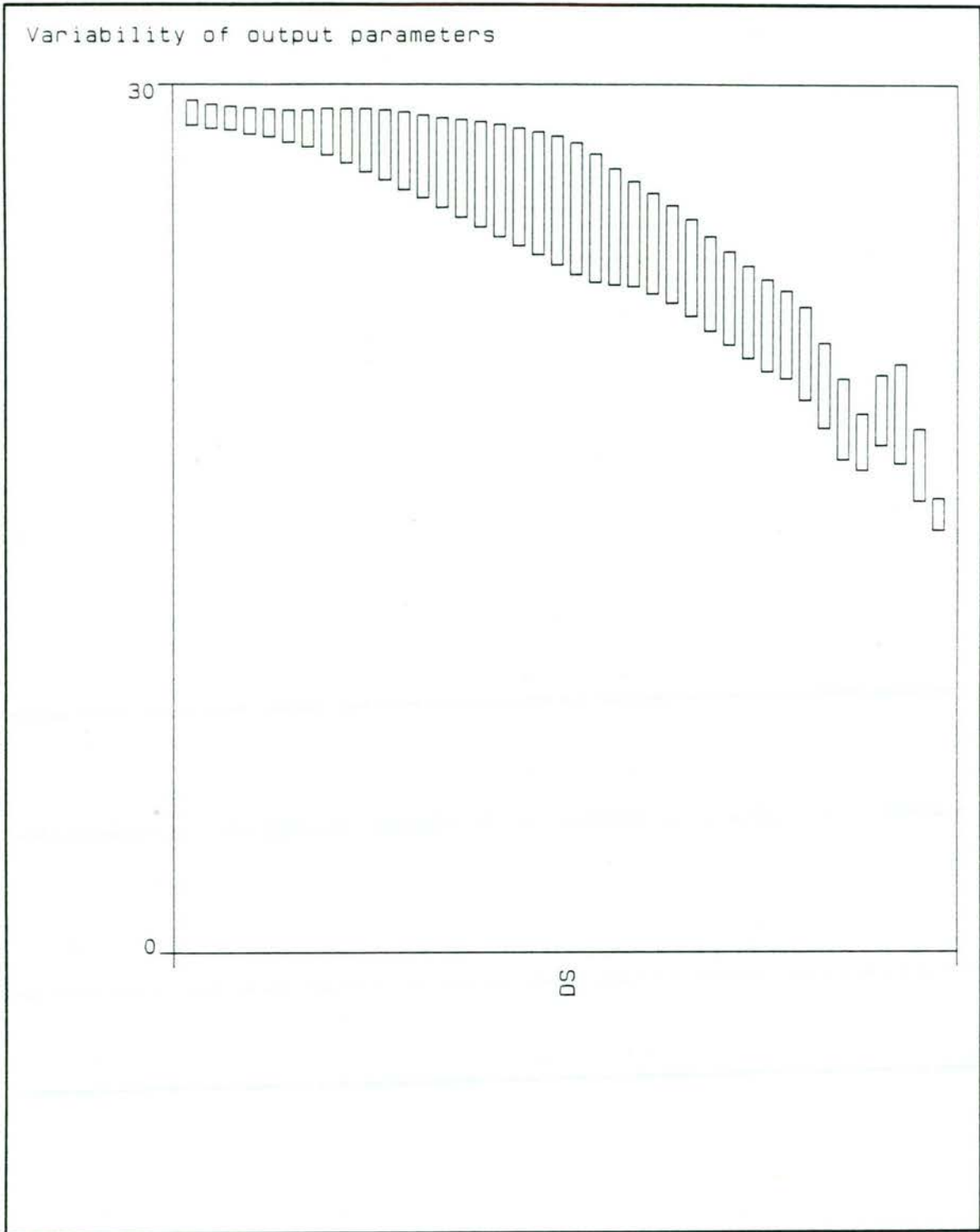


Fig. 4.8 Het verloop van de golfrichtingsspreiding en de totale onzekerheid langs de raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt t.o.v. de kust (zie Fig. 4.1) , verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

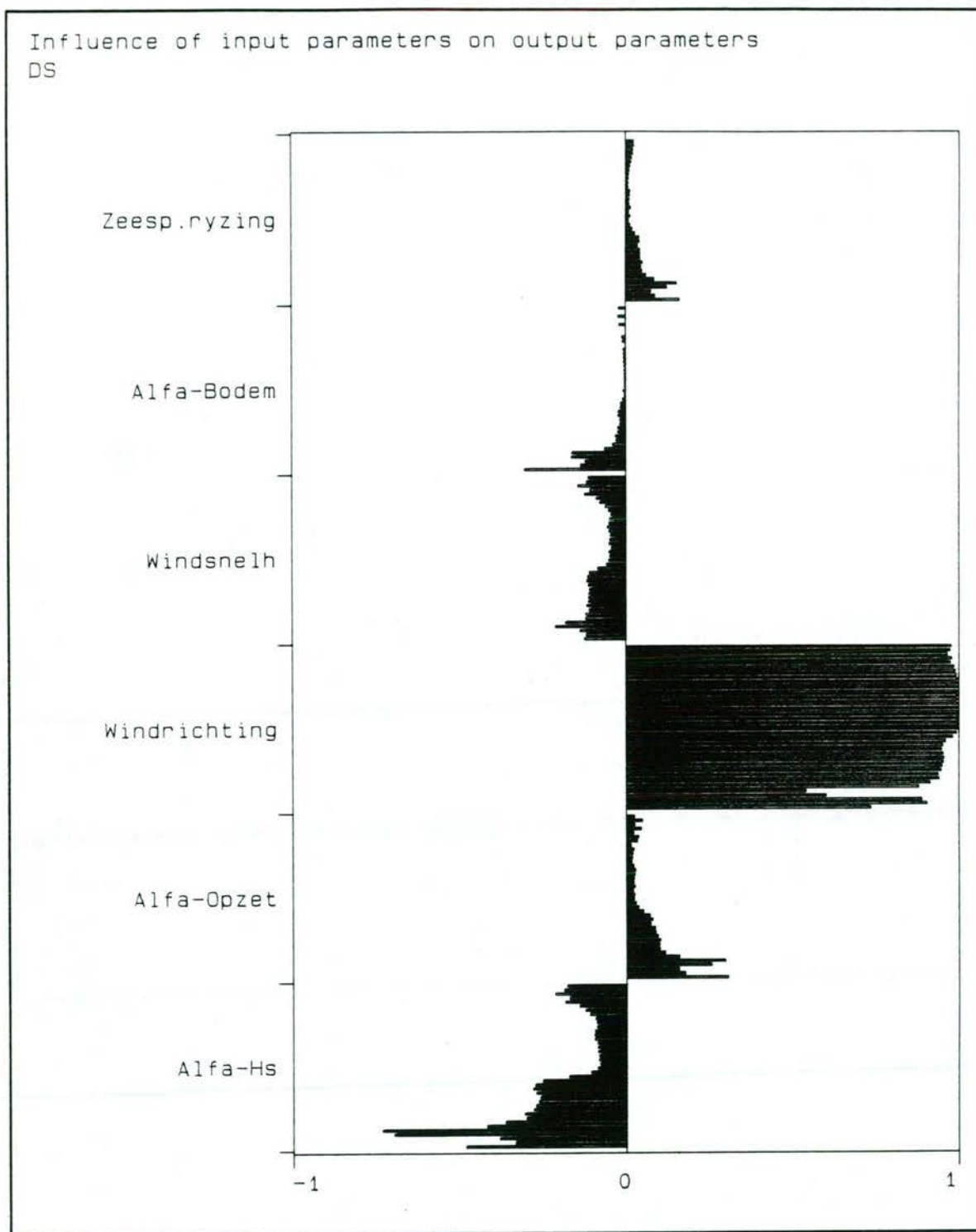


Fig. 4.9 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs een raai loodrecht op (het midden van) de Hondsbosse Zeewering. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 4.1; waterlijn op NAP aan onderzijde van iedere figuur).

4.5 Conclusies

De conclusies die uit het bovenstaande ten aanzien van de lokatie aan de teen van de Hondsbosse Zeewering getrokken kunnen worden zijn:

- a. De significante golfhoogte is nauwelijks gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water) en zijn onzekerheid (0.45 m) wordt gedomineerd door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s , diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij).
- b. De gemiddelde golfperiode is gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water) maar zijn onzekerheid (0.7 s) wordt bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s , diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de diep water golfhoogte (incl. $\bar{T}$, diep water).
- c. De gemiddelde golfrichting is gevoelig voor de windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water) en zijn onzekerheid (7°) wordt ook bepaald door de windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water).
- d. Ondanks dat de golfrichtingsspreiding nauwelijks gevoelig is voor de windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water) wordt zijn (zeer geringe) onzekerheid (0.6°) gedomineerd door de windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water).
- e. De onzekerheid in de zeespiegelrijzing is van redelijk belang voor de onzekerheden in de significante golfhoogte bij de teen van de dijk. Hij is niet of nauwelijks van belang voor de onzekerheden in de andere golfparameters.

5 Resultaten Haringvliet

De situatie in de Haringvliet is, gezien de bodemtopografie behandeld als een 2-dimensionale situatie. De bodemtopografie is gegeven in Fig. 5.1. Het ruimtelijk oplossendvermogen voor de bodemtopografie is 250 m x 250 m en voor de berekeningen 133 m x 355 m. Het oplossendvermogen in de spectrale richtingen is 10°. Er zijn drie raaien onderzocht (zie ook Fig. 5.1 en 5.1a):

- (a) sluis-waterlijn: de waterlijn van de Haringvlietsluizen,
- (b) hoofd-raai : van het centrum van de Haringvlietsluizen naar zee toe,
- (c) parallel-raai : over de Hinderplaat, evenwijdig aan de hoofd-raai.

De waarden van de omgevingsparameters (zeespiegelrijzing etc.) zijn gegeven in tabel 2.6.

5.1 Significante golfhoogte

5.1.1 Sluis-waterlijn

In de basissituatie (Fig. 5.2 en 5.3) varieert de significante golfhoogte langs de sluizen van 1.46 m tot 2.20 m met een waarde van 2.00 m bij het centrum van de sluizen. De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .30 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ centrum Haringvlietsluizen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.29
α - bodemrijzing	-.29
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.73
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.09
α - windopzet (incl. getij)	.52
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.11

Tabel 5.1 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de significante golfhoogte H_s bij het centrum van de Haringvlietsluizen

Uit deze tabel blijkt dat de onzekerheid in de significante golfhoogte in het centrum van de Haringvlietsluizen in belangrijke mate bepaald wordt door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de wind opzet (incl. getij). De onzekerheid in de significante golfhoogte is enigermate bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de waterlijn van de sluizen varieert enigszins: van .23 m tot .35 m (Fig. 5.3).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.4. Het meest opvallende is de grote variatie in de bijdragen van de onzekerheid in de schatting van de bodemrijzing: van vrijwel geen bijdrage aan de noordzijde tot een redelijke bijdrage aan de zuidzijde van de sluizen. De bijdrage van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is matig, ook al is hij iets belangrijker aan de noordkant dan aan de zuidkant.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ centrum Haringvlietssluisen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.18
bodemrijzing	-.72
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.07
windrichting (= θ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.31
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.05

Tabel 5.2 De gevoeligheden van de significante golfhoogte bij het centrum van de Haringvlietssluisen

5.1.2 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 5.3) neemt de significante golfhoogte H_s langs de hoofd-raai af van 5.5 m in diep water tot 1.93 m nabij het centrum van de sluizen. De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .28 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse van de onzekerheid in het nabij gelegen centrum van de sluizen is hierboven gegeven.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de hoofd-raai neemt geleidelijk af van .82 m in diep water tot .28 m bij het centrum van de sluizen (Fig. 5.3).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.5. Het meest opvallende is de afname van de invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing en in de schatting van de windopzet (incl. getij) en de afname van de invloed van de onzekerheid in de diep water significante golfhoogte van de kust af. De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) neemt af naar dieper water.

5.1.3 Parallel-raai

Langs de parallel-raai neemt, analoog aan de situatie bij de hoofd-raai, de significante golfhoogte af van 5.5 m in diep water naar 2.4 m in het ondiepste deel van de raai (Fig. 5.3).

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de parallel-raai varieert van .84 m in diep water tot .30 m in ondiep water (Fig. 5.3).

Het gedrag van de genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters langs de raai in deze onzekerheid (gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.6) is in wezen gelijk aan dat langs de hoofd-raai.

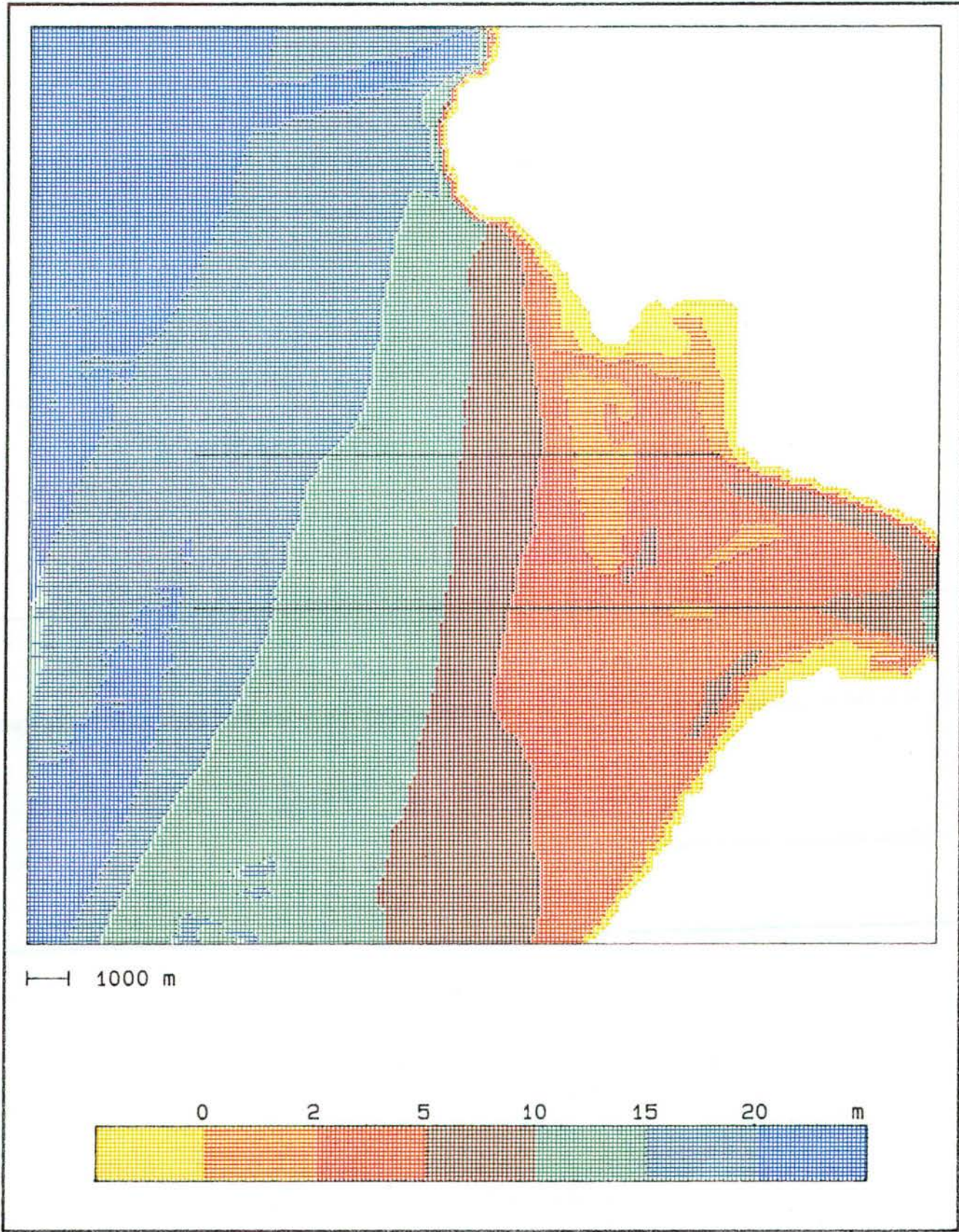


Fig. 5.1 De bodemtopografie van de Haringvliet, bodemligging t.o.v. NAP in m.

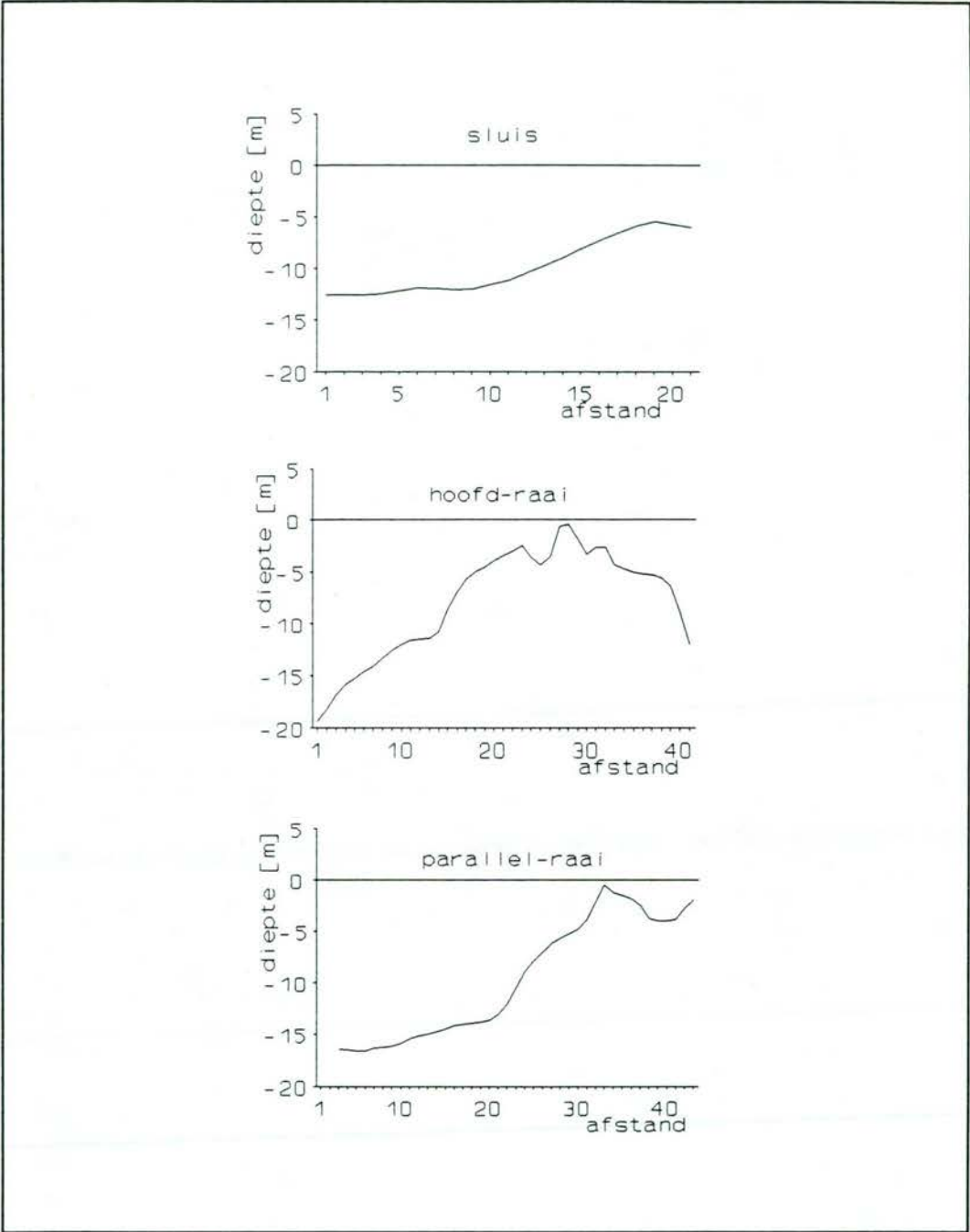


Fig. 5.1a Het verloop van de bodemligging langs de raaien (t.o.v. NAP) in de Haringvliet. Horizontaal is uitgezet de afstand (aantal gridpunten) langs de raai, verticaal is uitgezet de diepte in m.

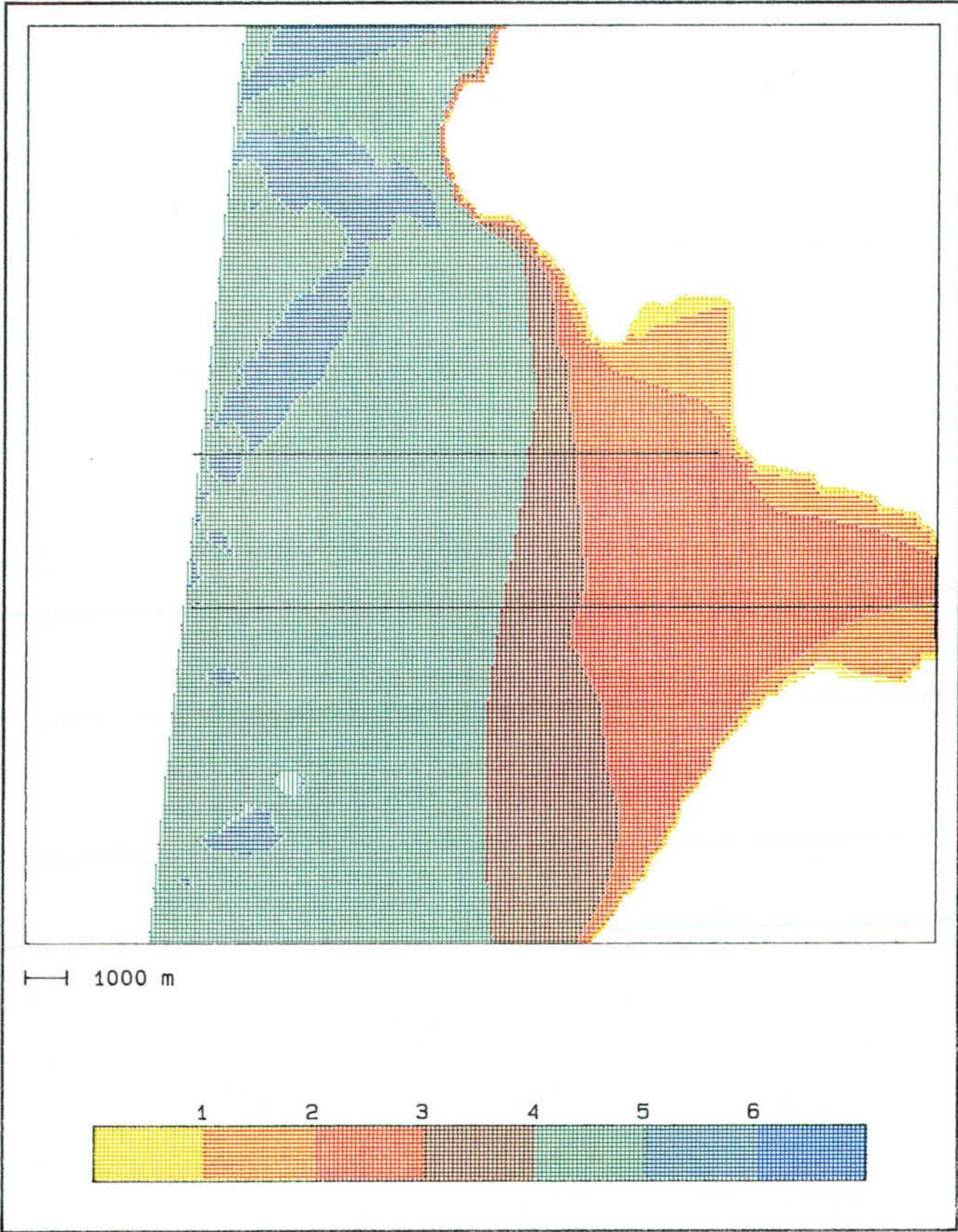


Fig. 5.2 De significante golfhoogte in de basissituatie in de Haringvliet (in m).

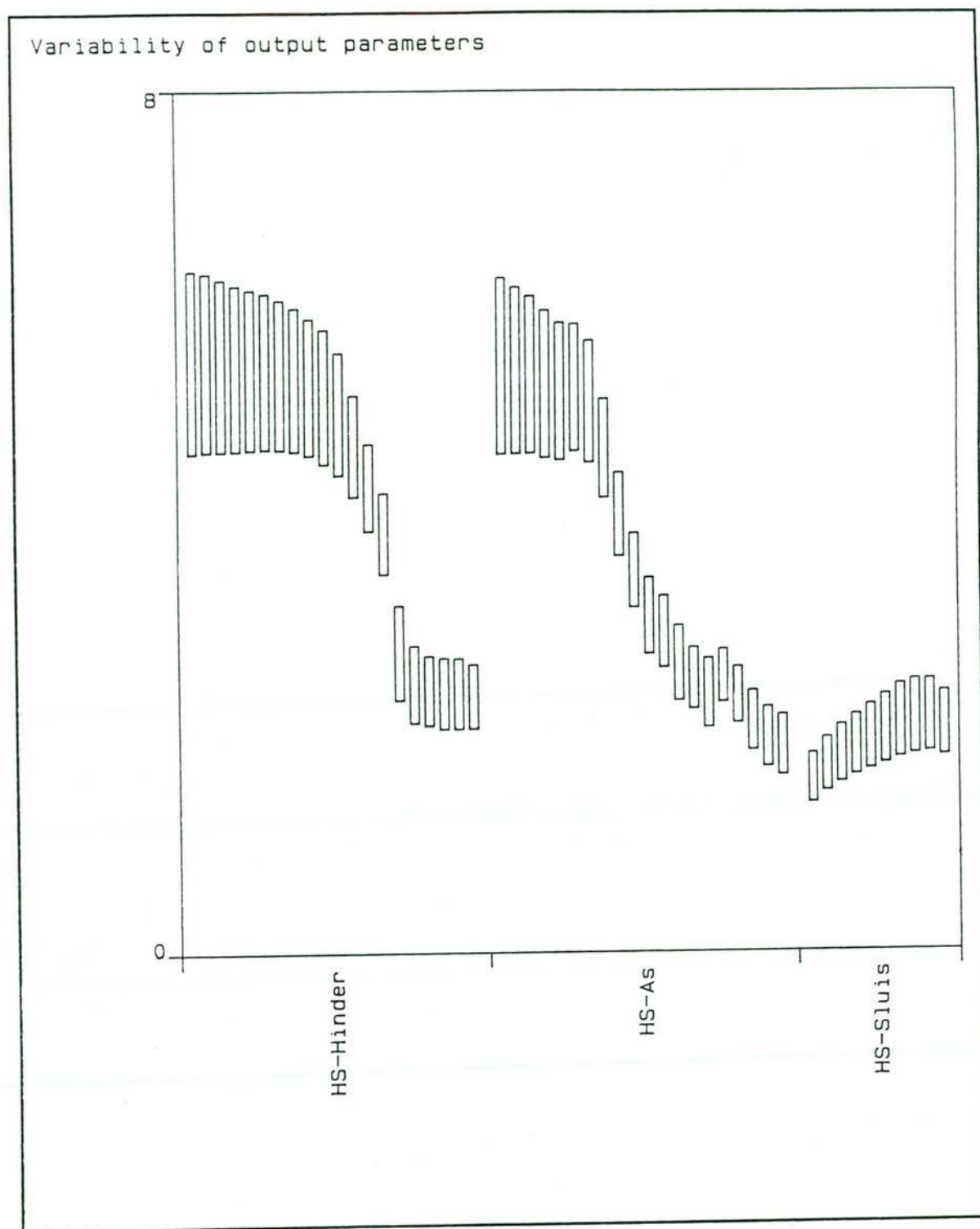


Fig. 5.3 Het verloop van de significante golfhoogte in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Haringvliet raaien (Sluis = sluis-waterlijn (links is noord), As = hoofd-raai (links is diep water) en Hinder = parallel-raai (links is diep water)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 5.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

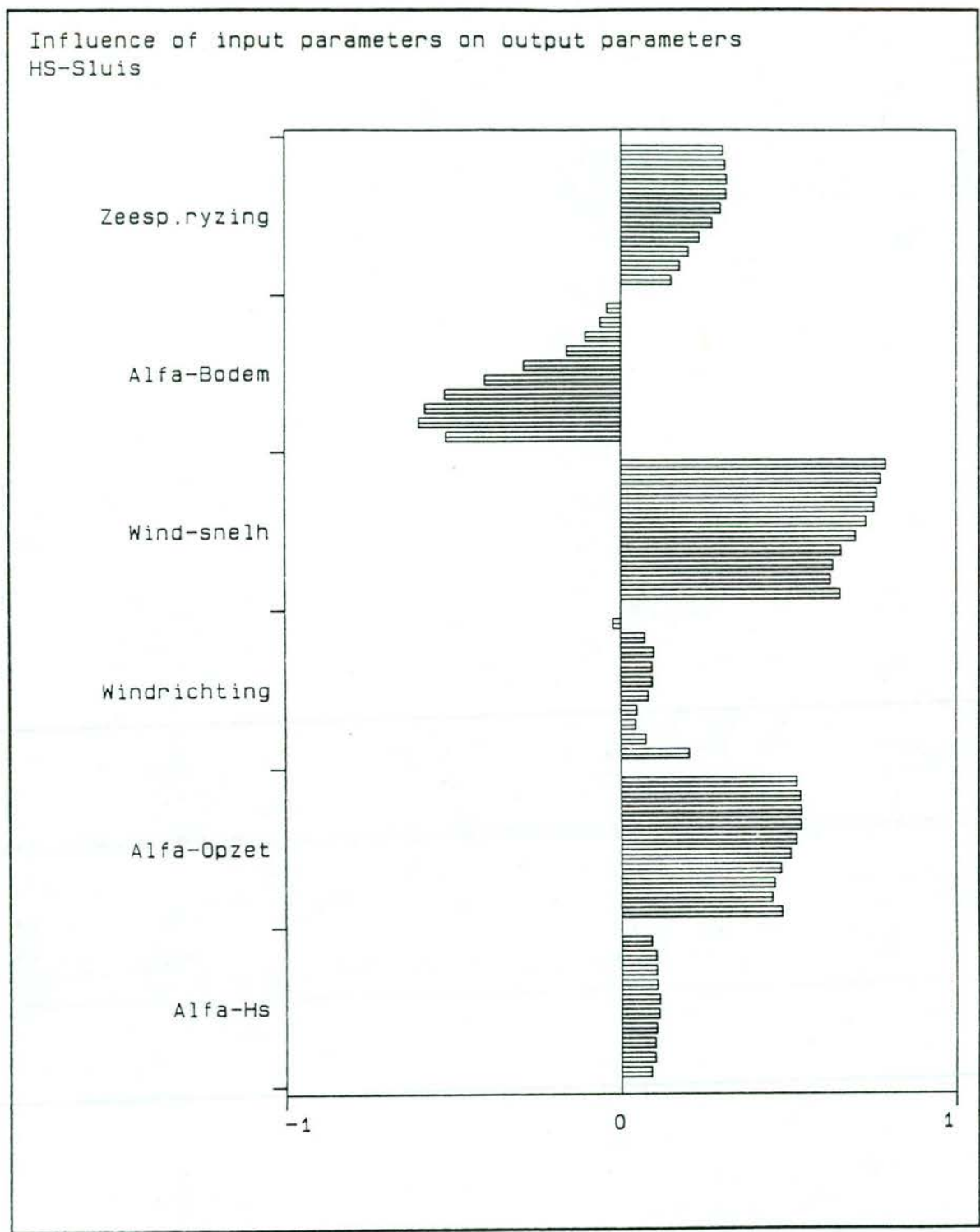


Fig. 5.4 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de sluis-waterlijn. Per omgevingsparameter is uitgezet:
horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; zuid aan onderzijde van iedere figuur).

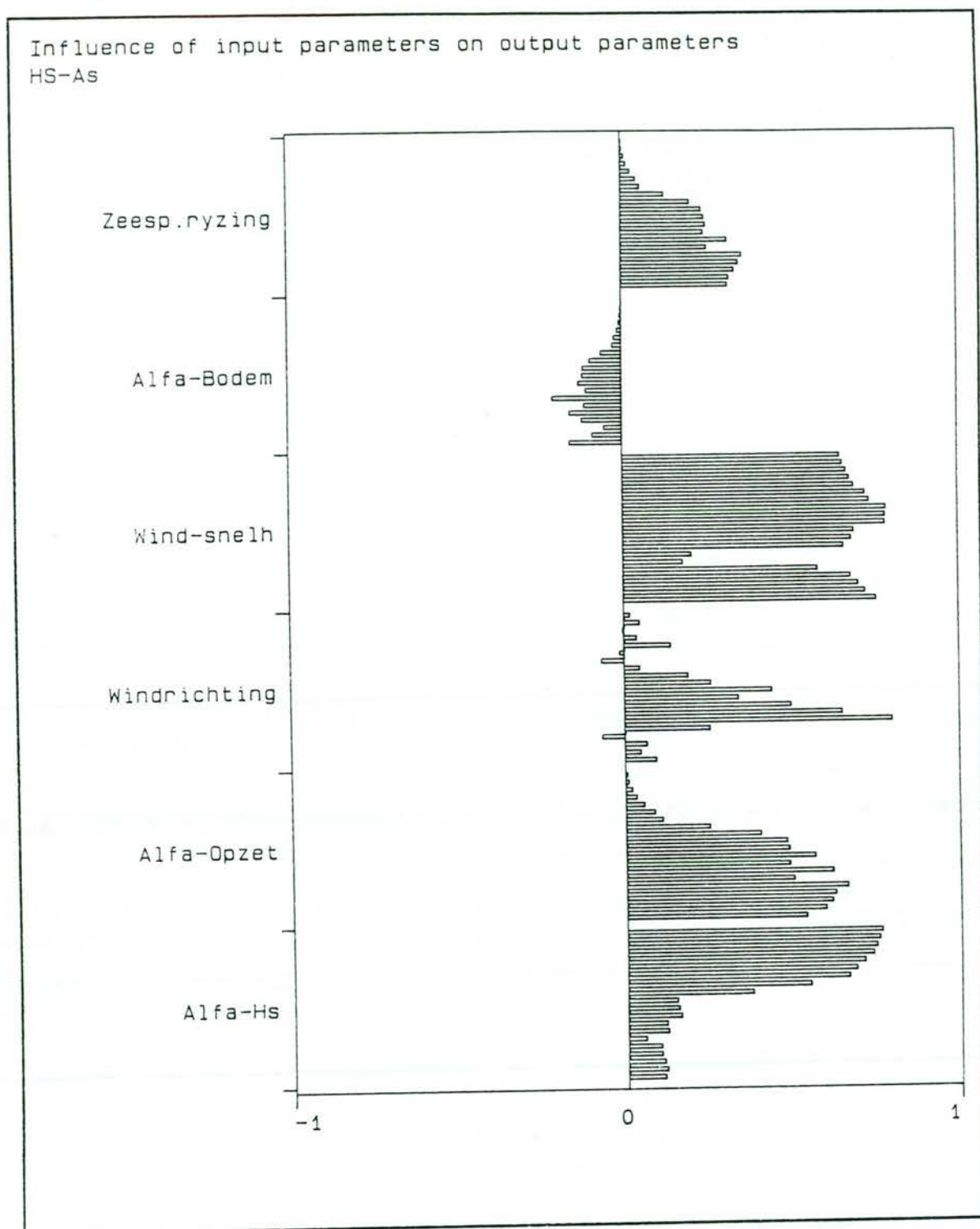


Fig. 5.5 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; sluizen aan onderzijde van iedere figuur).

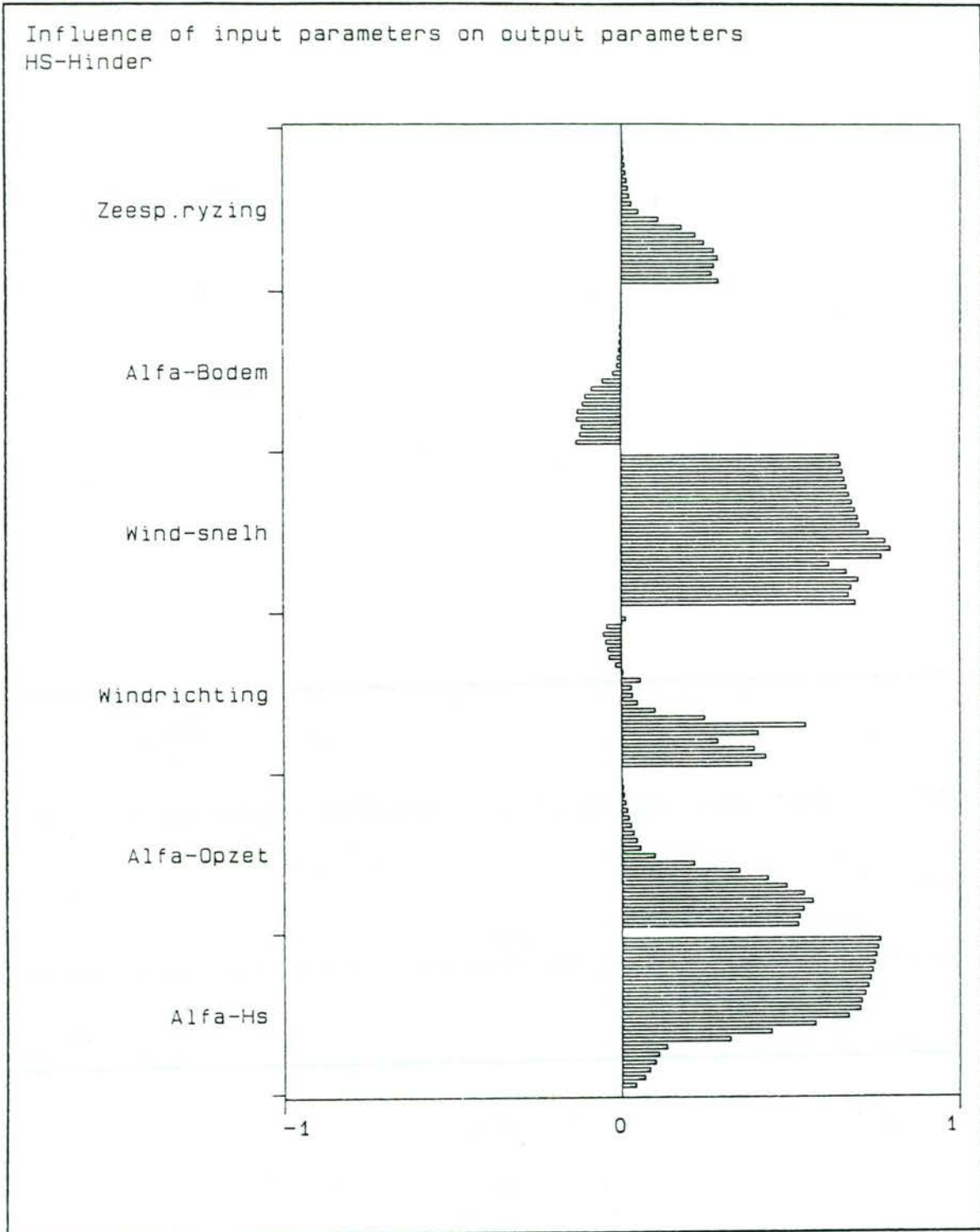


Fig. 5.6 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de parallel-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; kust aan onderzijde van iedere figuur).

5.2 Gemiddelde golfperiode

5.2.1 Sluis-waterlijn

In de basissituatie (Fig. 5.7 en 5.8) varieert gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ nauwelijks langs de sluizen (rond 5.7 s). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode in het centrum van de sluizen bedraagt .4 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ centrum Haringvlietsluizen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.13
α - bodemrijzing	-.16
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.66
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.54
α - windopzet (incl. getij)	.33
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.32

Tabel 5.3 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ bij het centrum van de Haringvlietsluizen

Uit deze tabel blijkt dat de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode in het centrum van de Haringvlietsluizen vooral bepaald wordt door de onzekerheid in de wind: windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). Hij wordt nauwelijks bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de sluis-waterlijn varieert enigszins: van .30 s aan de zuidkant tot .43 s aan de noordkant (Fig. 5.8).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de sluis-waterlijn worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.9. Het meest opvallende is de redelijke stabiliteit van de belangrijkste bijdragen behalve die van de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ centrum Haringvlietsluizen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.10
bodemrijzing	-.48
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.08
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	-.01
windopzet (incl. getij)	.25
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.18

Tabel 5.4 De gevoelheden van de gemiddelde golfperiode bij het centrum van de Haringvlietsluizen

5.2.2 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 5.8) neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ langs de hoofd-raai af van 8.6 s in diep water tot 5.8 s nabij het centrum van de sluisen. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt .4 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse van deze onzekerheid is hierboven gegeven.

De totale onzekerheden in de gemiddelde golfperiode langs de hoofd-raai varieert van 1.3 s in diep water tot .4 in ondiep water (Fig. 5.8).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.10. De invloed van de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) is vrijwel konstant maar die van de windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water) neemt snel af naar dieper water. Hij blijft vrij ongevoelig voor de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing). De invloed van de ondiepe delen van de Haringvliet is enigszins merkbaar in dalingen van de bijdragen.

5.2.3 Parallel-raai

In de basissituatie (Fig. 5.8) neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$, analoog aan de situatie bij de hoofd-raai, langs de parallel-raai af van 8.6 s in diep water tot 6.0 s aan het eind van de raai. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt .5 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk).

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai varieert van 1.3 s in diep water tot .5 s in ondiep water (Fig. 5.8).

Het gedrag van de genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid (gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.11) is in wezen gelijk aan dat langs de hoofd-raai, behalve dat de onzekerheid in de windrichting minder effect heeft.

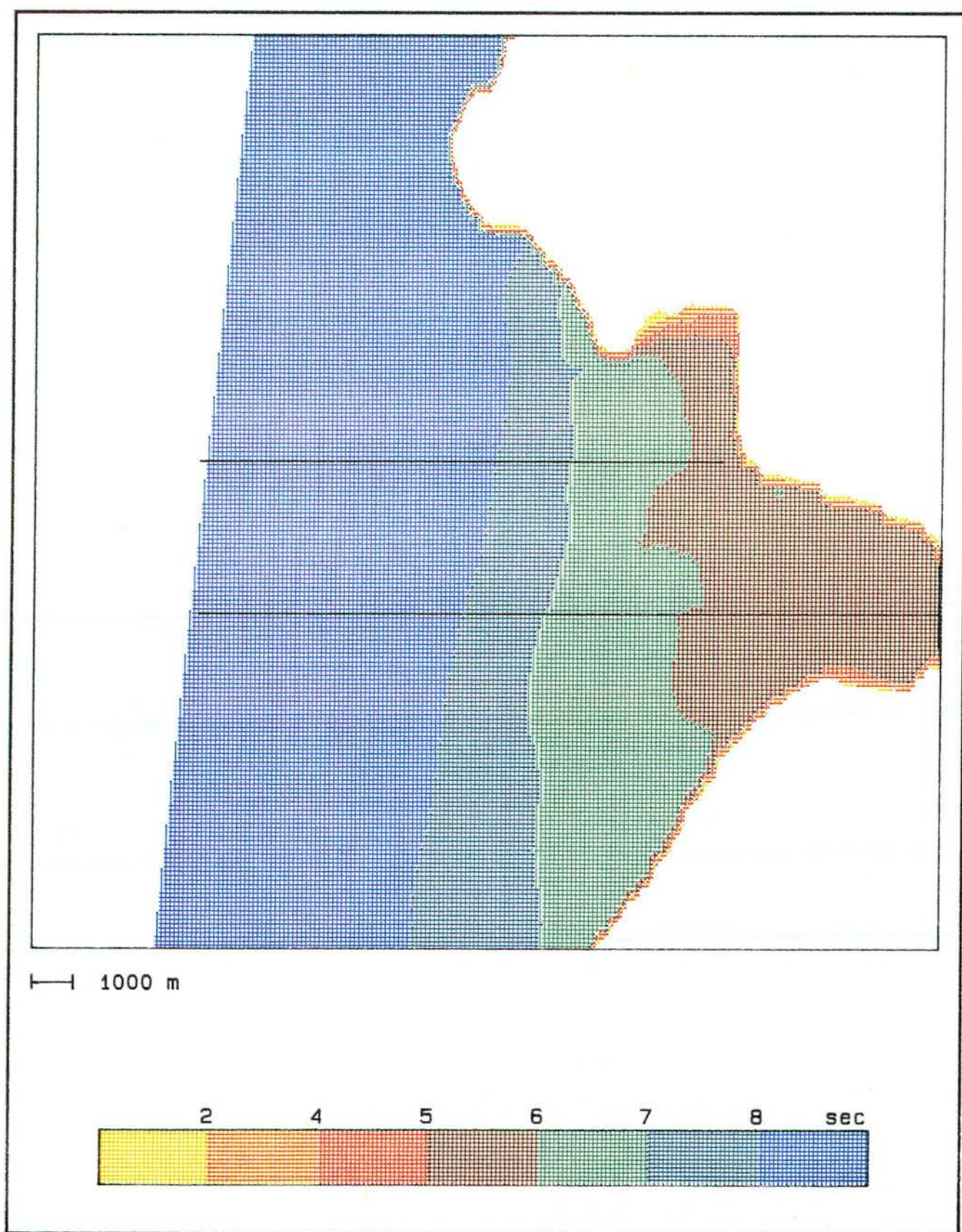


Fig. 5.7 De gemiddelde golfperiode in de basissituatie in de Haringvliet (in s).

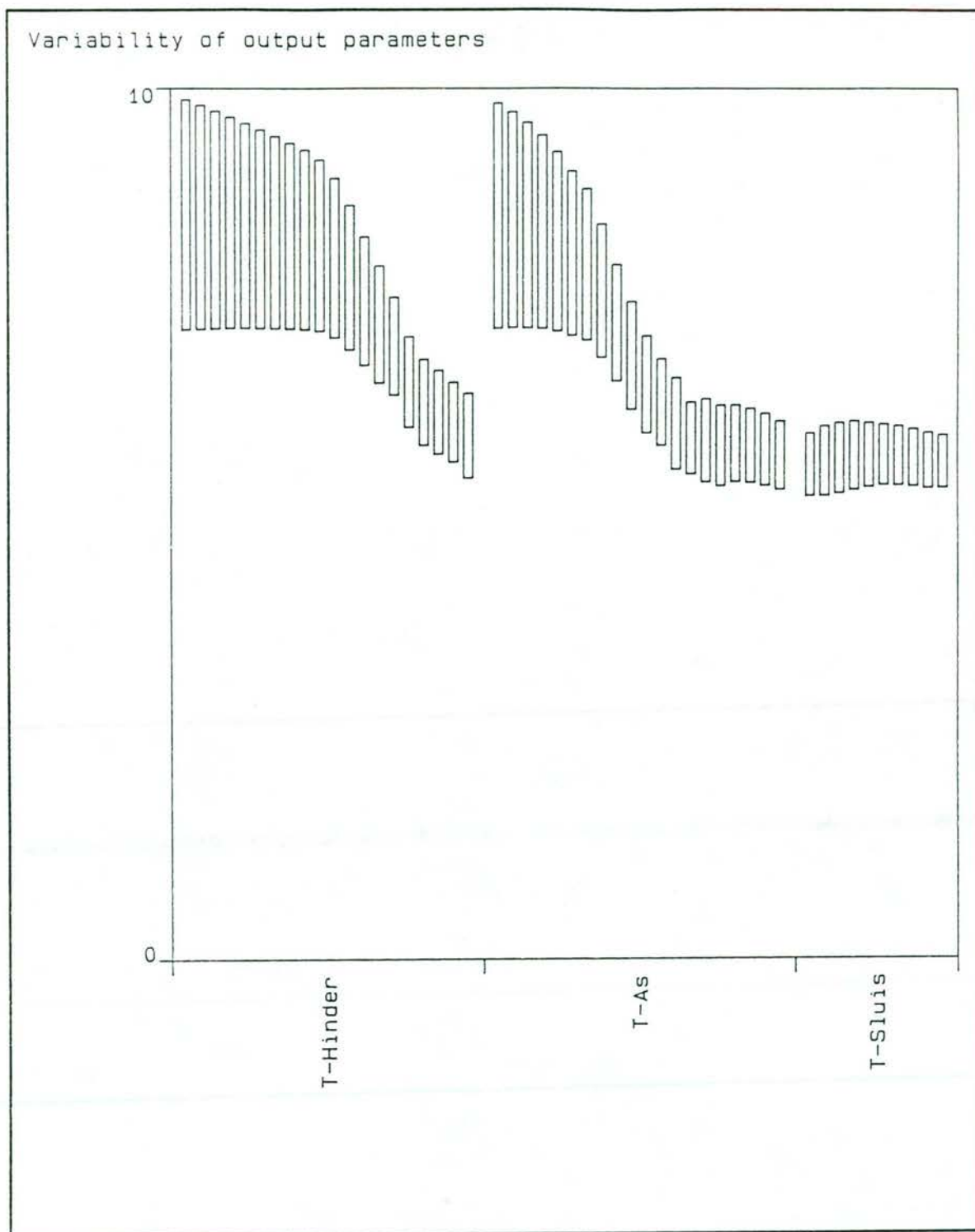


Fig. 5.8 Het verloop van de gemiddelde golfperiode in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Haringvliet raaien (Sluis = sluis-waterlijn (links is noord), As = hoofd-raai (links is diep water) en Hinder = parallel-raai (links is diep water)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 5.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in s).

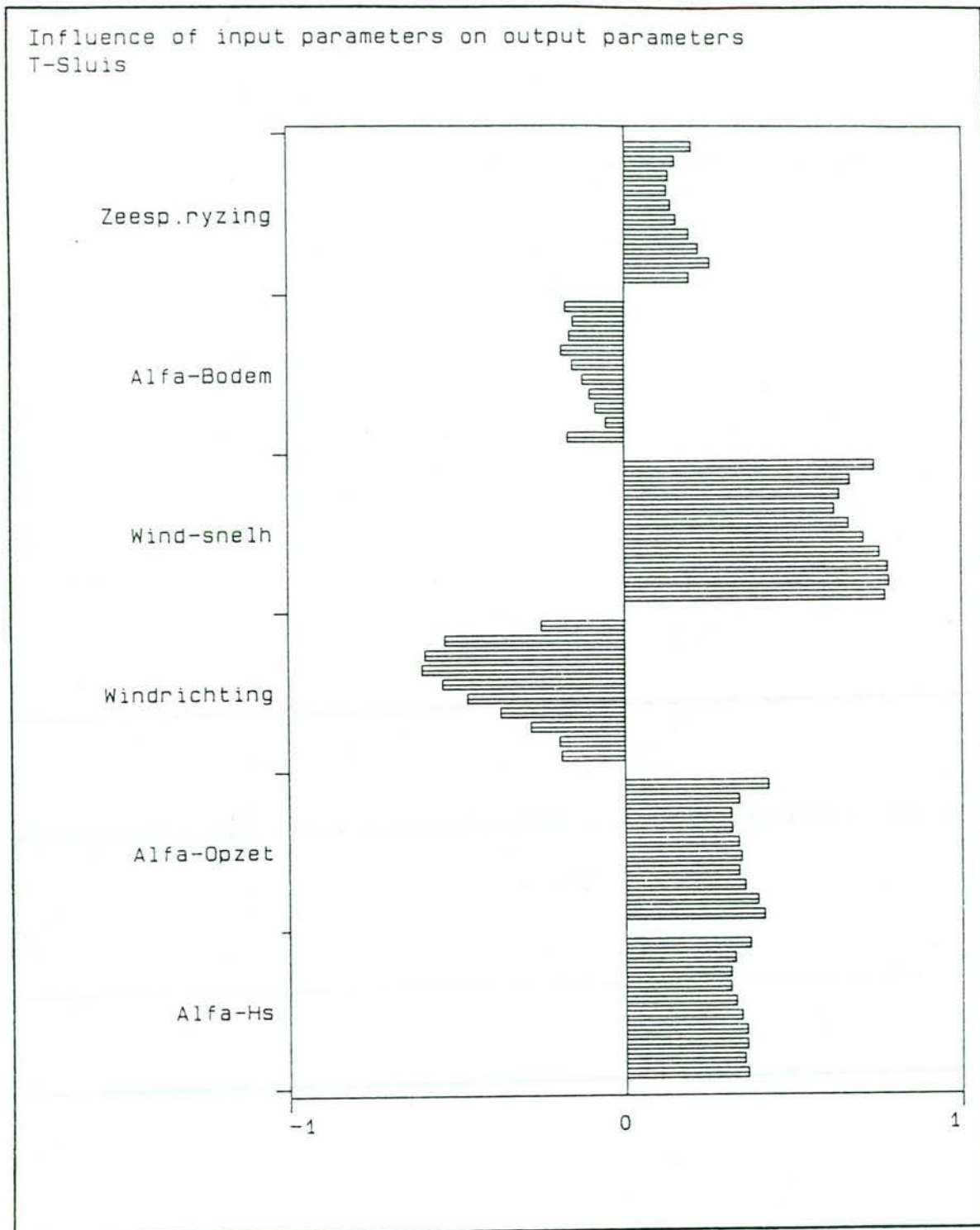


Fig. 5.9 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de sluis-waterlijn. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; zuid aan onderzijde van iedere figuur).

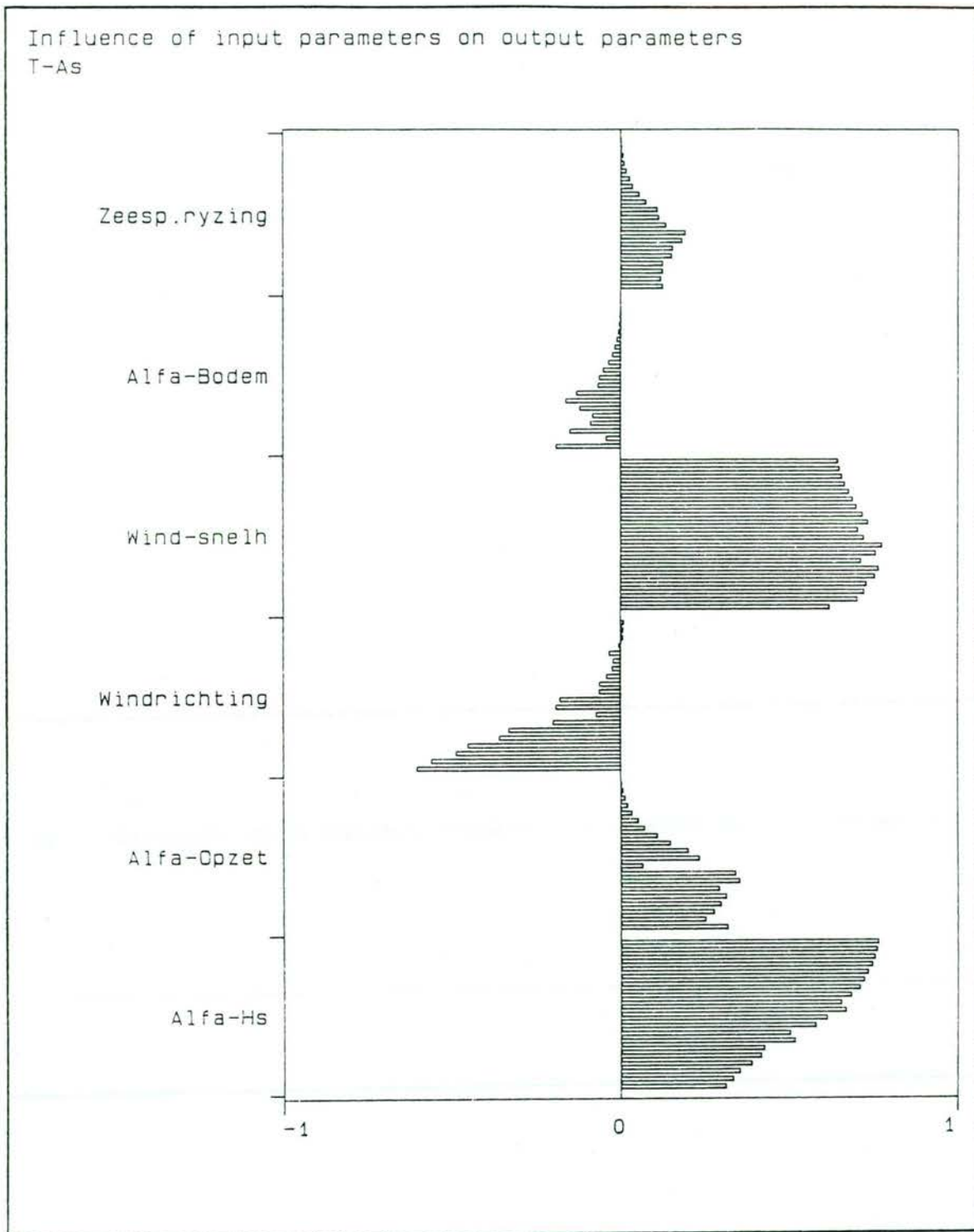


Fig. 5.10 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; sluizen aan onderzijde van iedere figuur).

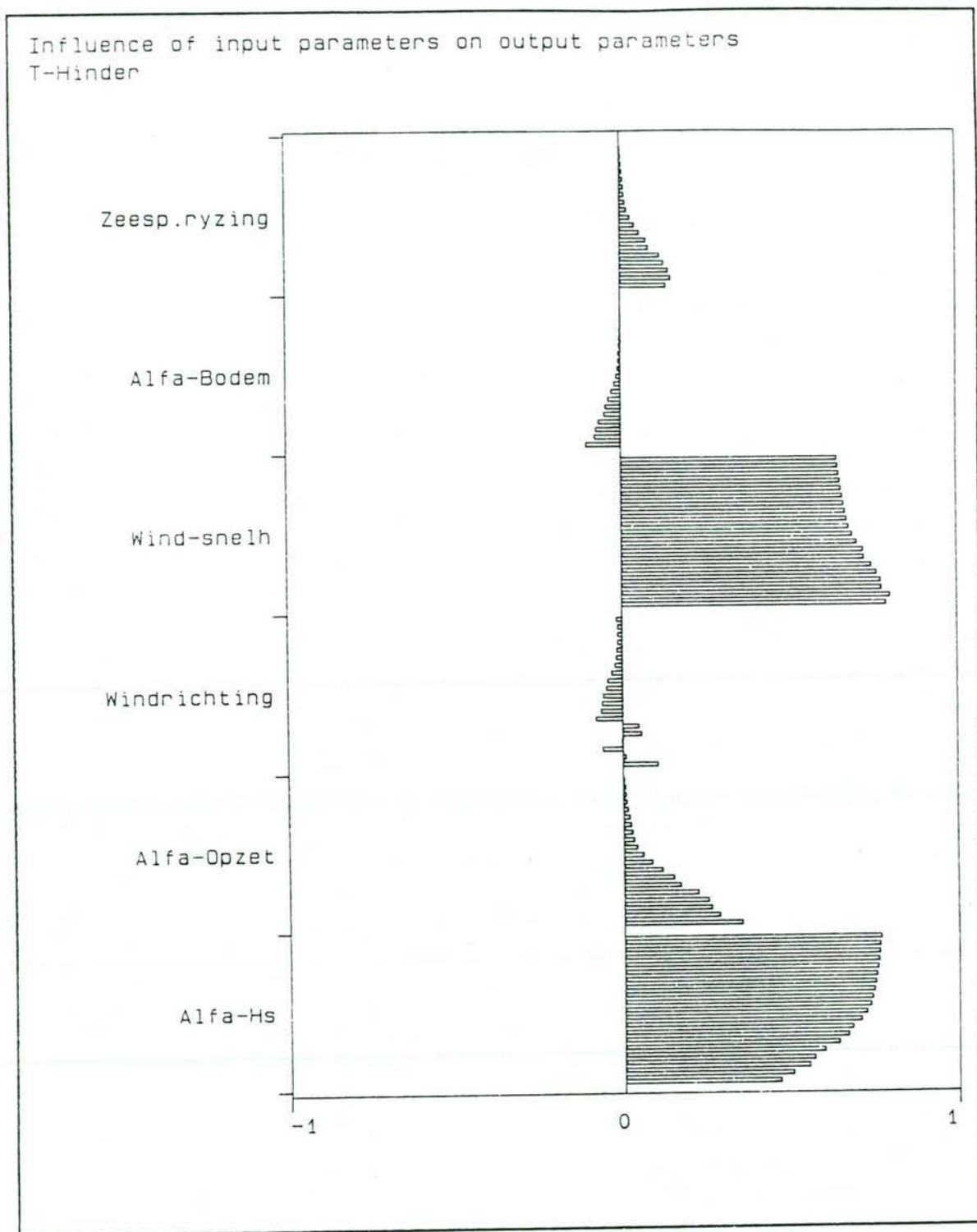


Fig. 5.11 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de parallel-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; kust aan onderzijde van iedere figuur).

5.3 Gemiddelde golfrichting

5.3.1 Sluis-waterlijn

In de basissituatie (Fig. 5.12) draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ langs de sluizen: van 264° (nautische conventie) aan de zuidkant naar 293° aan de noordkant. De richting in het centrum is 276° . De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting bij het centrum bedraagt 3° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ centrum Haringvlietssluzen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.17
α - bodemrijzing	.11
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.42
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.84
α - windopzet (incl. getij)	-.16
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.19

Tabel 5.5 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ bij het centrum van de Haringvlietssluzen

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting in het centrum van de Haringvlietssluzen wordt blijkbaar vooral bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). Hij wordt enigermate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en slechts matig door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de waterlijn van de sluizen fluctueert van 1.6° aan de noordkant tot 3.6° aan de zuidkant (Fig. 5.12).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.13. Het meest opvallende is de konstante dominantie van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) en de vrij grote onregelmatigheid van de invloed van de onzekerheid in de schatting van de bodemrijzing. De invloed van de zeespiegelrijzing neemt drastisch toe naar het noorden.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ centrum Haringvlietsluizen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.12
bodemrijzing	3.23
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.47
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.19
windopzet (incl. getij)	-1.11
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.96

Tabel 5.6 De gevoeligheden van de gemiddelde golfrichting bij het centrum van de Haringvlietsluizen

5.3.2 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 5.12) draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ langs de hoofd-raai slechts van 276° in diep water naar 279° (nautische conventie) nabij het centrum van de sluizen. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting bij het centrum bedraagt 3° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse van deze onzekerheid is hierboven gegeven.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de hoofd-raai neemt af van 14° in dieper water naar 3° bij de sluizen.

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.14. De invloed van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) neemt snel toe naar dieper water en blijft dominant. Het belang van de overige omgevingsparameters (dus ook de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) blijft gering. De invloed van de ondiepe delen van de Haringvliet is enigszins merkbaar.

5.3.3 Parallel-raai

Langs de parallel-raai is de draaiing van de gemiddelde golfrichting van dezelfde orde als langs de hoofd-raai behalve in ondiep water (Fig. 5.12).

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting neemt geleidelijk af van 15° in diep water naar 6° in ondiep water (Fig. 5.12).

Het gedrag van de genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid (gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.15) is in wezen gelijk aan dat langs de hoofd-raai, zij het dat de onzekerheid in de diep water windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) nog dominanter is.

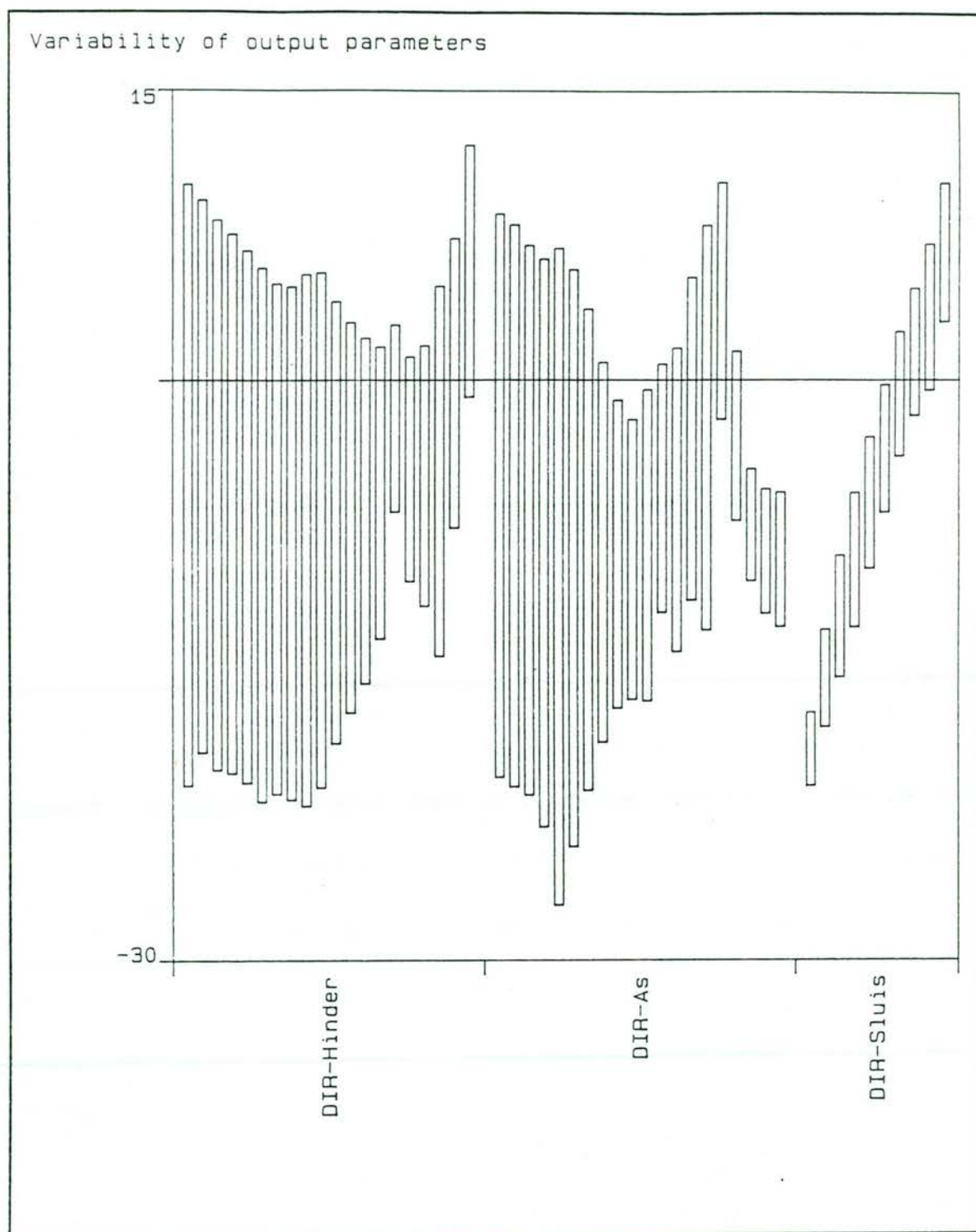


Fig. 5.12

Het verloop van de gemiddelde golfrichting (Cartesische conventie van HISWA) in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Haringvliet raaien (Sluis = sluis-waterlijn (links is noord), As = hoofd-raai (links is diep water) en Hinder = parallel-raai (links is diep water)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 5.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

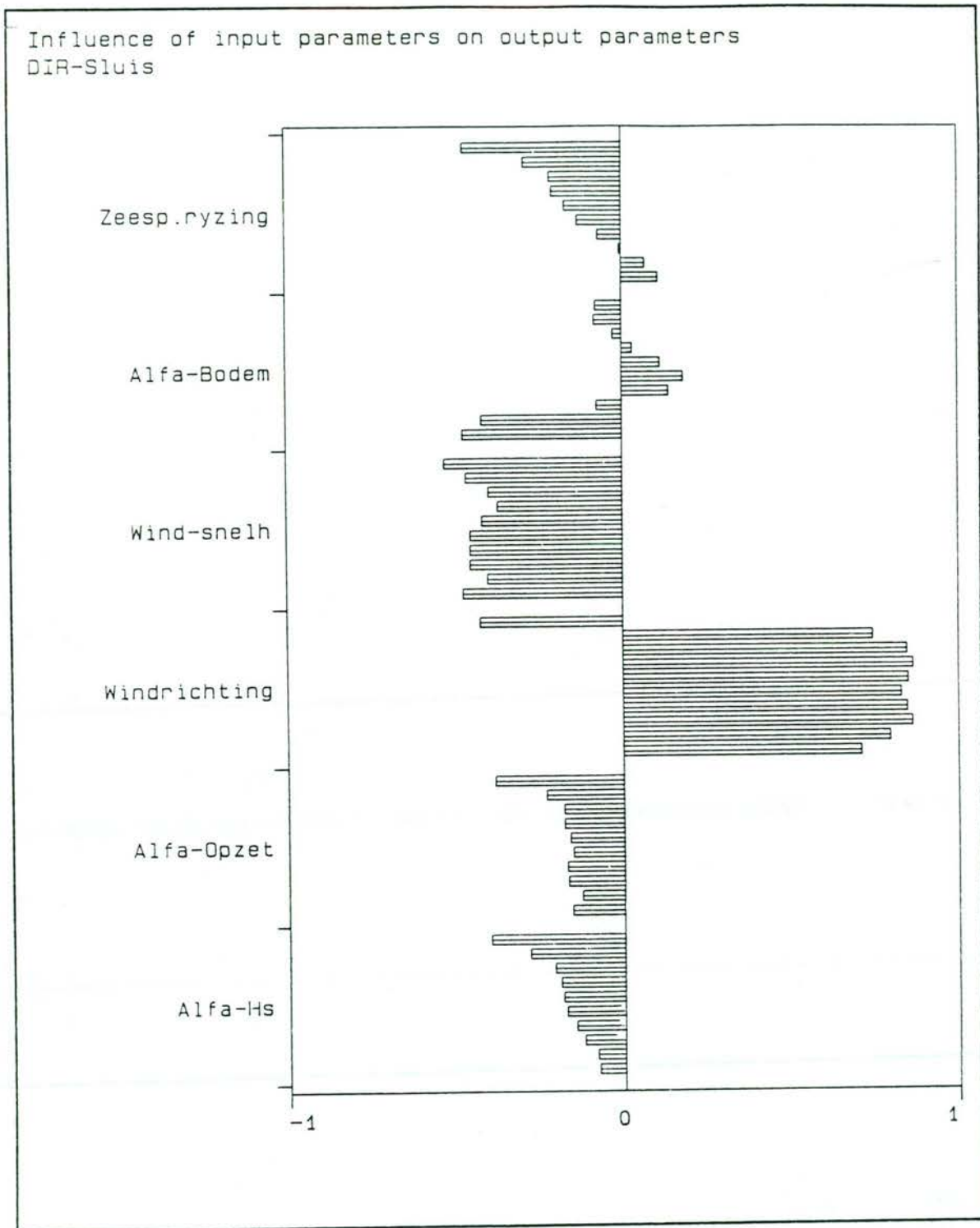


Fig. 5.13 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de sluis-waterlijn. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; zuid aan onderzijde van iedere figuur).

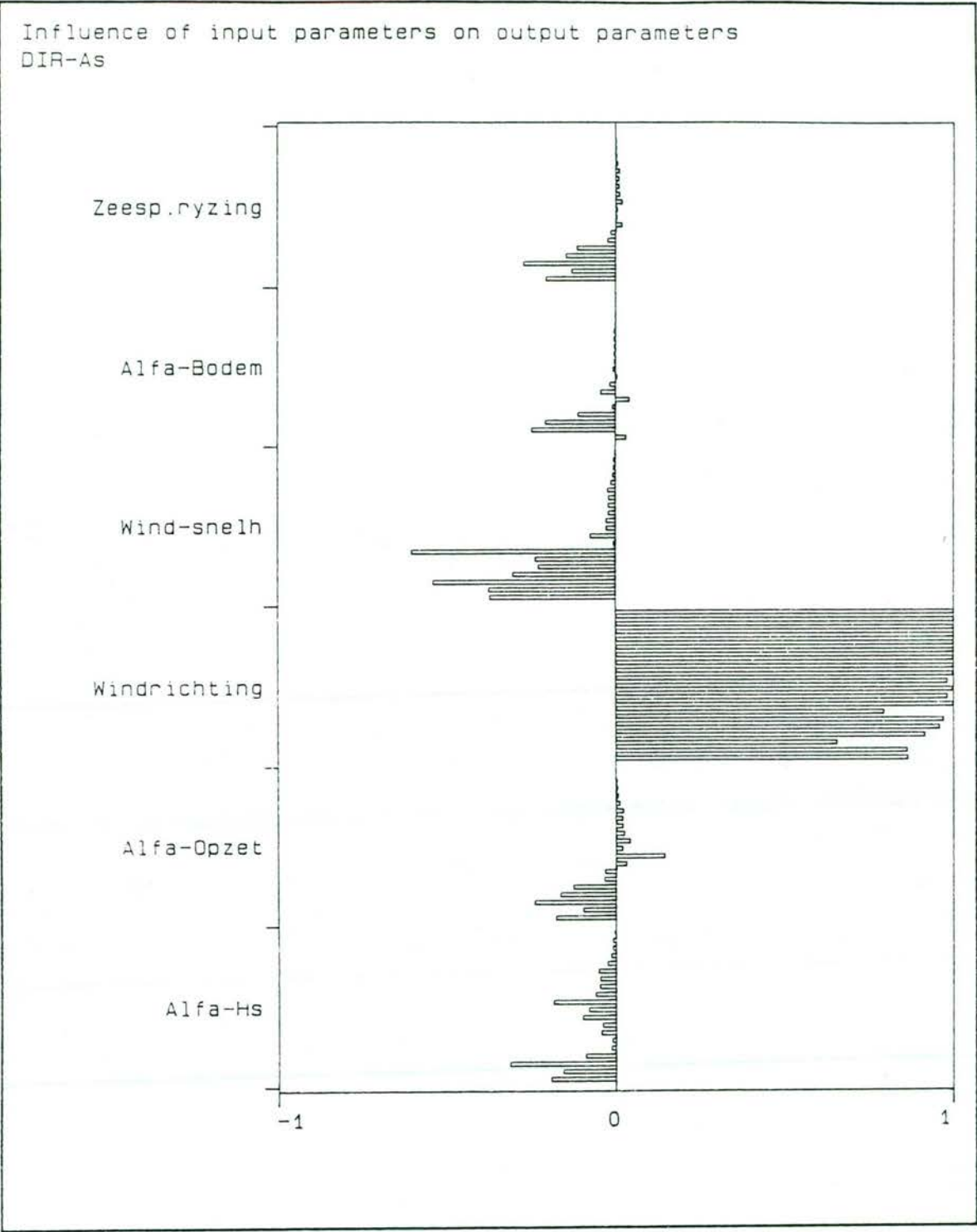


Fig. 5.14 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; sluizen aan onderzijde van iedere figuur).

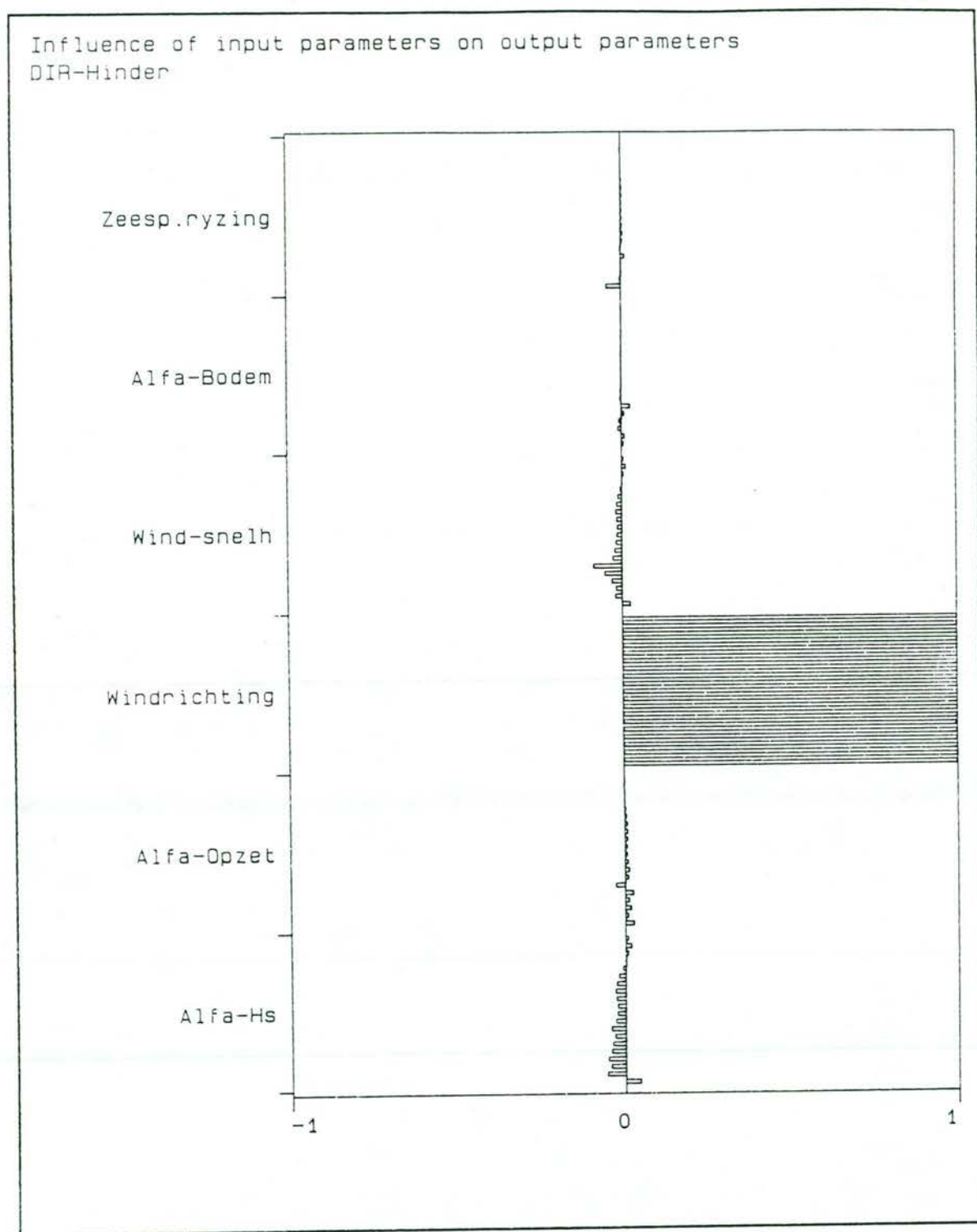


Fig. 5.15 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de parallel-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; kust aan onderzijde van iedere figuur).

5.4 Golfrichtingsspreiding

5.4.1 Sluis-waterlijn

In de basissituatie (Fig. 5.16) fluctueert de golfrichtingsspreiding σ_θ langs de sluizen rond de 20° met een waarde van 20° nabij het centrum van de sluizen. De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding bij het centrum van de sluizen bedraagt slechts 2° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ centrum Haringvlietssluisen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.17
α - bodemrijzing	.09
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.25
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.91
α - windopzet (incl. getij)	-.26
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.07

Tabel 5.7 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ bij het centrum van de Haringvlietssluisen

De onzekerheid in de golfrichtingsspreiding in het centrum van de Haringvlietssluisen wordt blijkbaar vooral bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). Hij wordt slechts matig bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de waterlijn van de sluizen fluctueert enigszins maar neemt geleidelijk toe van 1° aan de zuidkant naar 2° nabij het centrum (Fig. 5.15).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.17.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ centrum Haringvlietssluzen
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.62
bodemrijzing	1.42
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.16
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.11
windopzet (incl. getij)	-.96
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.20

Tabel 5.8 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding bij het centrum van de Haringvlietssluzen

5.4.2 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 5.16) neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ langs de hoofd-raai af van 30° in diep water naar 20° nabij het centrum van de sluzen. De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar bedraagt 2° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse van deze onzekerheid is hierboven gegeven.

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de hoofd-raai varieert aanzienlijk (Fig. 5.16) maar blijft kleiner dan 3°.

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.18. Het onregelmatige gedrag valt op. Dit hangt vrijwel zeker samen met de kleine waarde van de totale onzekerheid.

5.4.3 Parallel-raai

Langs de parallel-raai is de afname van de golfrichtingsspreiding vrijwel gelijk aan die langs de hoofd-raai (van 30° naar 22°, met een totale onzekerheid aan het eind van de raai van slechts 2° (Fig. 5.16).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de parallel-raai varieert langzaam (Fig. 5.16).

Het gedrag van de genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid (gegeven in het staafdiagram van Fig. 5.19) is iets stabielier dan langs de hoofd-raai maar overigens in wezen gelijk aan dat langs de hoofd-raai (behalve de invloed van de onzekerheid in de wind).

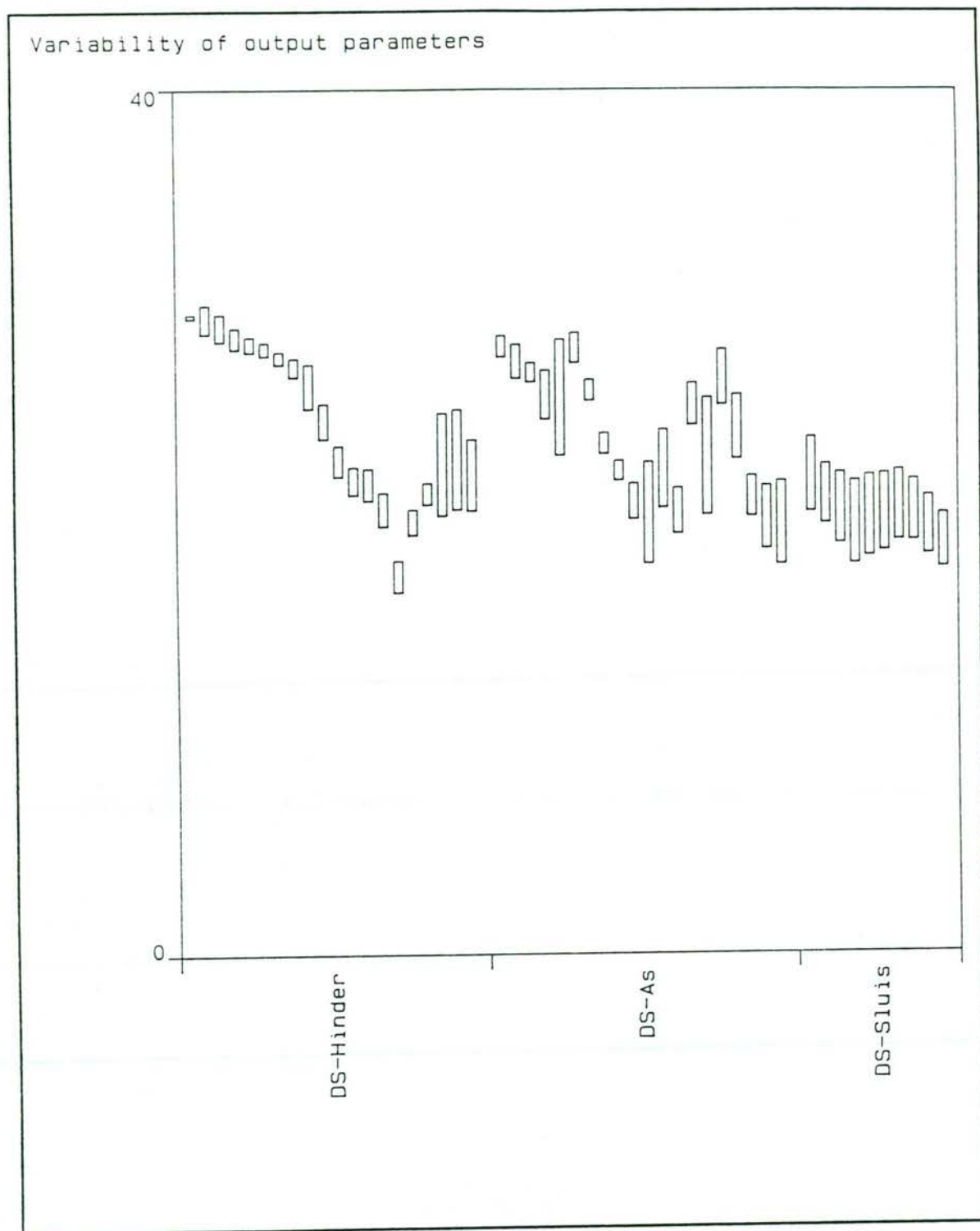


Fig. 5.16 Het verloop van de golfrichtingsspreiding in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Haringvliet raaien (Sluis = sluis-waterlijn (links is noord), As = hoofd-raai (links is diep water) en Hinder = parallel-raai (links is diep water)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 5.1), verticaal is uitgezet de significante golfhoogte + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

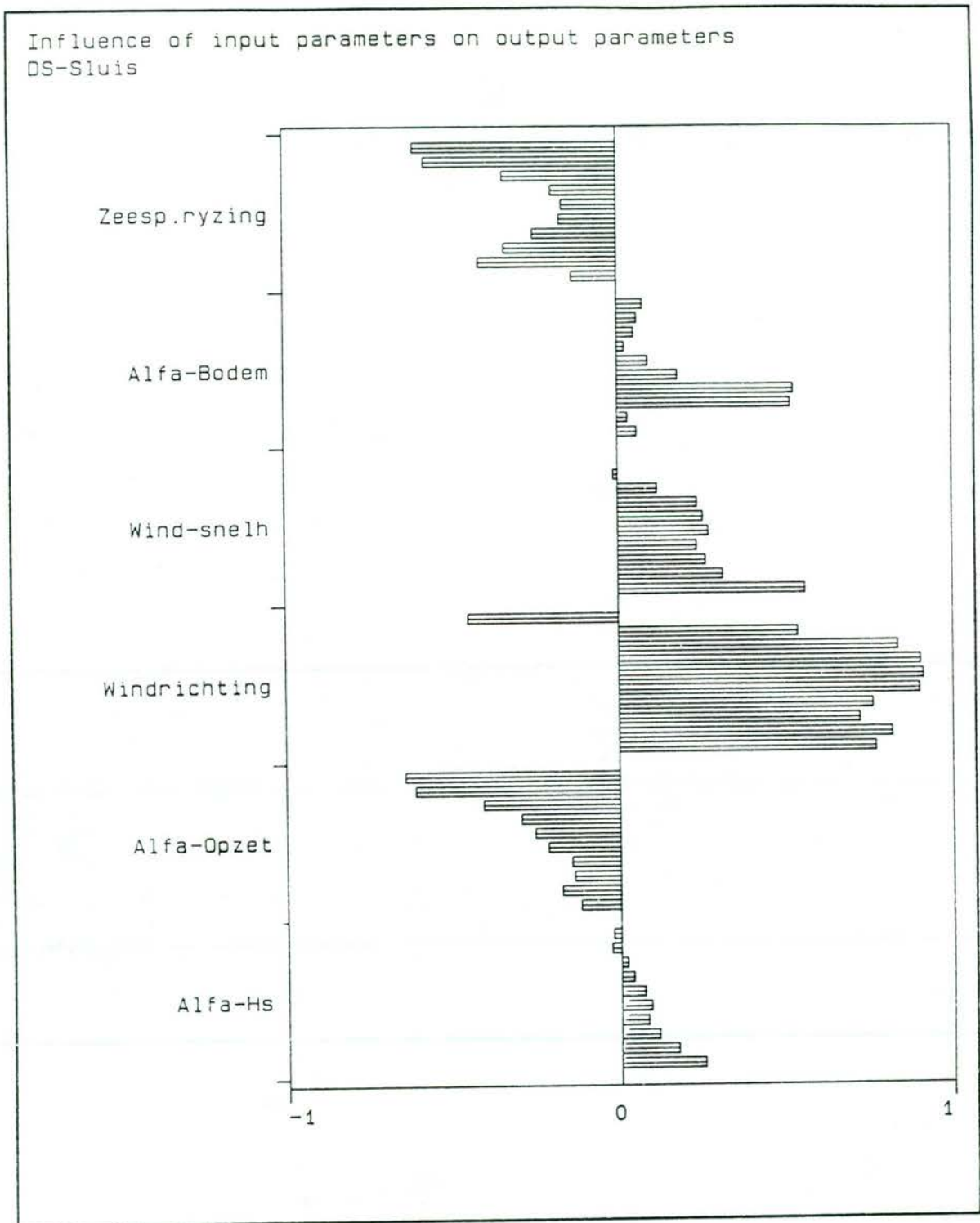


Fig. 5.17 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de sluis-waterlijn. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; zuid aan onderzijde van iedere figuur).

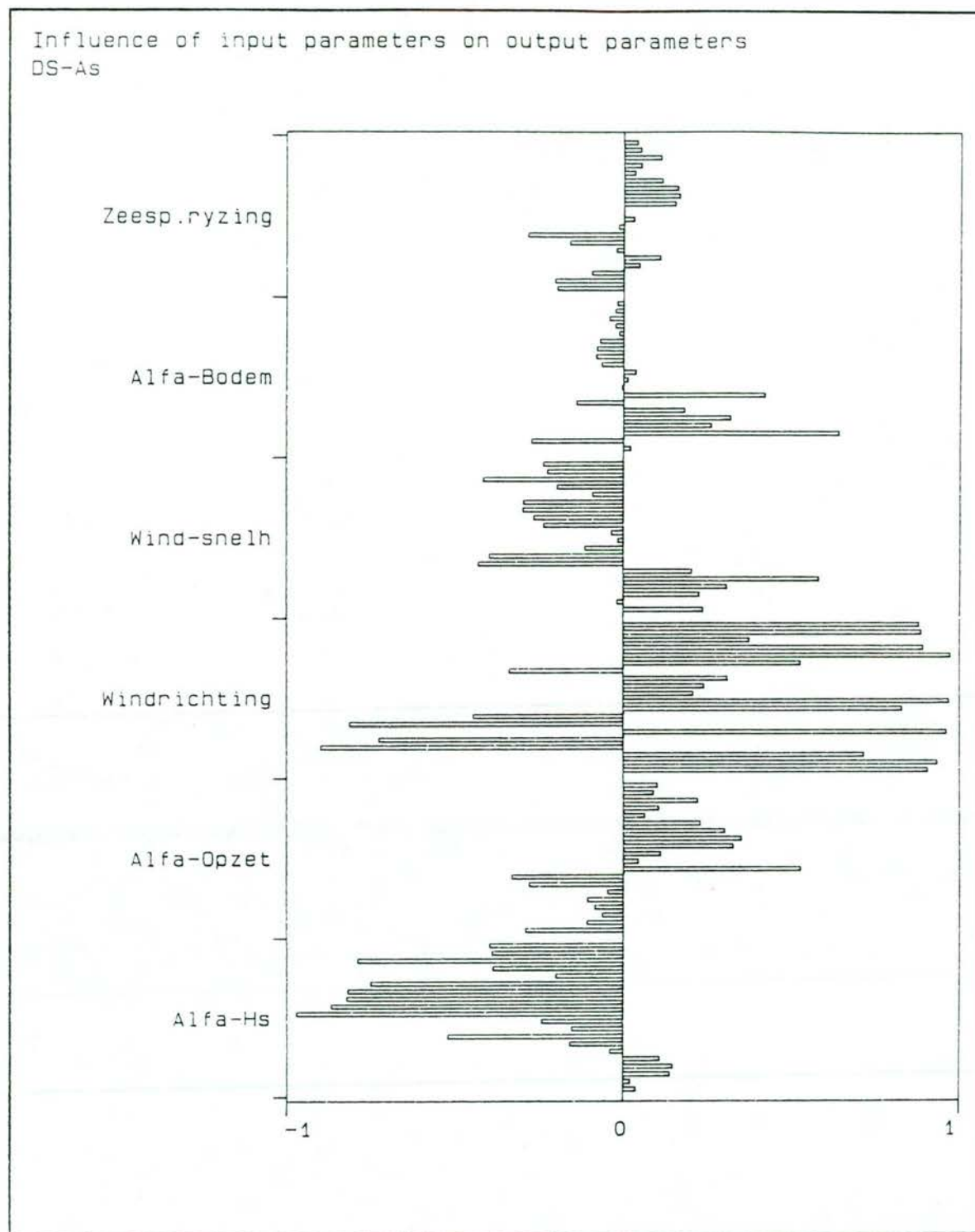


Fig. 5.18 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; sluizen aan onderzijde van iedere figuur).

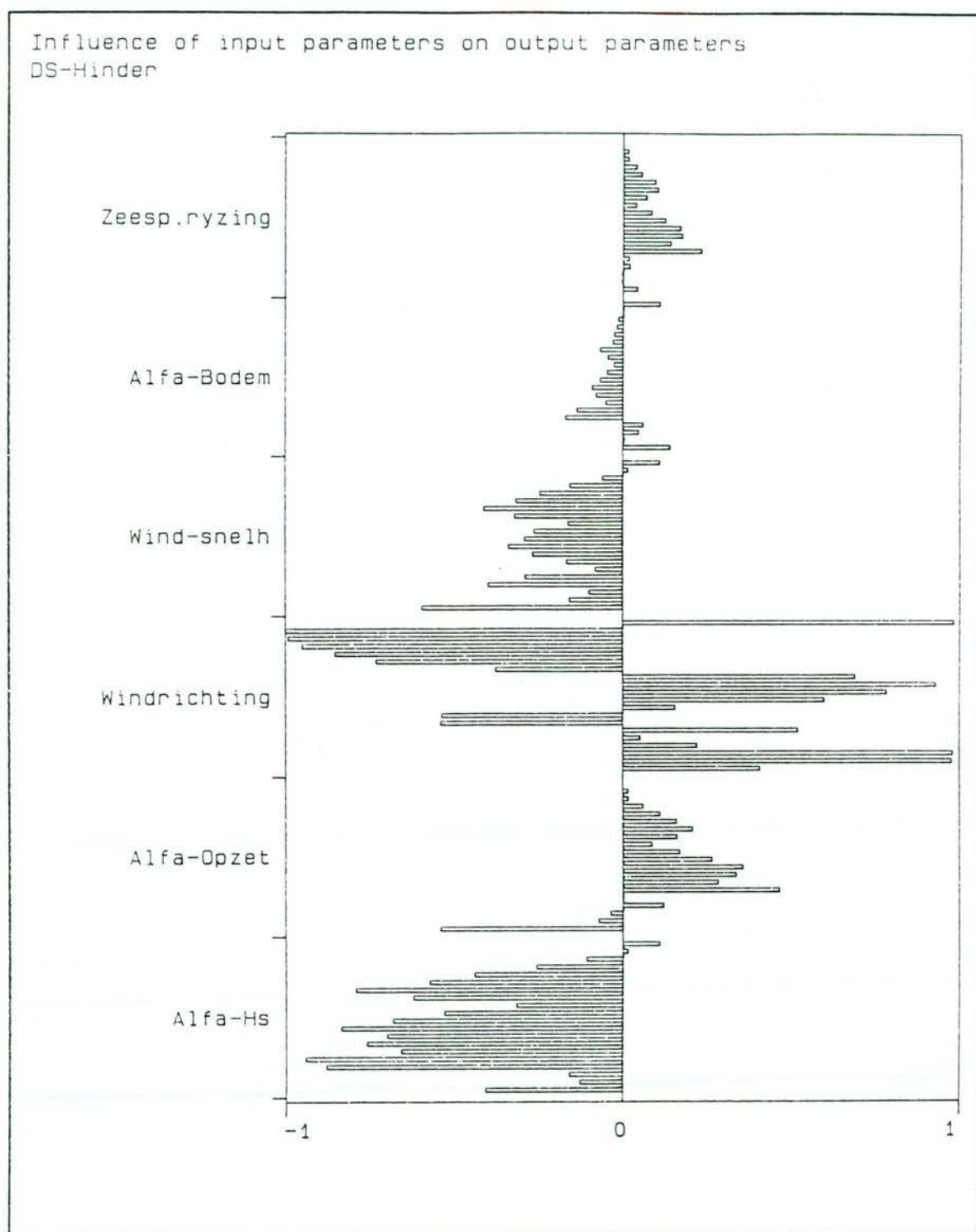


Fig. 5.19 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de parallel-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : de genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 5.1; kust aan onderzijde van iedere figuur).

5.5 Conclusies

De conclusies die uit het bovenstaande ten aanzien van de lokatie centrum Haringvlietssluisen getrokken kunnen worden zijn:

- a. De significante golfhoogte is enigszins gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Maar zijn onzekerheid (0.30 m) wordt vooral bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en enigszins door de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij).
- b. Evenals de significante golfhoogte is de gemiddelde golfperiode enigszins gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Maar zijn onzekerheid (0.4 s) wordt vooral bepaald door de onzekerheid in de wind: windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).
- c. De gemiddelde golfrichting is enigszins gevoelig voor de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) en zijn onzekerheid (3°) wordt ook bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).
- d. De golfrichtingsspreiding is vrijwel niet gevoelig voor de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) maar zijn onzekerheid (2°) wordt wel bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).
- e. De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing is alleen van belang voor de significante golfhoogte. Voor de overige golfparameters is hij van gering of geen belang. Dit geldt ook voor alle waterstandparameters: zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing), bodemrijzing en opzet (incl. getij), behalve bij de gemiddelde golfperiode waar de schatting van de windopzet wel van belang is.

6 Resultaten Afsluitdijk

De situatie in de Waddenzee voor de golven die de Afsluitdijk naderen is, gezien de bodemtopografie, in eerste instantie behandeld als een 2-dimensionale situatie. De situatie voor de teen van de dijk is vervolgens met een vrij groot oplossend vermogen berekend met een 1-dimensionale geneste HISWA berekening in de grootschalige 2-dimensionale HISWA berekening. Het ruimtelijk oplossendvermogen in de 2-dimensionale situatie is voor de bodemtopografie 500 m x 500 m en voor de berekeningen 200 m x 500 m. Het ruimtelijk oplossendvermogen in de 1-dimensionale geneste situatie is voor de bodemtopografie 50 m en voor de berekeningen 10.7 m. Het oplossendvermogen in de spectrale richtingen is 10° . De bodemtopografie is gegeven in Fig. 6.1. Er zijn drie raaien¹ onderzocht (zie ook Fig. 6.1):

- (a) oost-raai : raai 24
- (b) midden-raai : raai 14
- (c) west-raai : raai 7

waarvan de bodemprofielen gegeven zijn in Fig. 6.2. De belangrijkste raai voor de opdrachtgever is de oost-raai (daar ligt een geul vlak voor de Afsluitdijk). De waarden van de omgevingsparameters zijn gegeven in Tabel 2.6.

6.1 Significante golfhoogte

6.1.1 Oost-raai

In de basissituatie (Fig. 6.3 en 6.4) neemt de significante golfhoogte H_s af van 6.5 m buiten de Waddeneilanden tot 2.01 m voor de Afsluitdijk ter plaatse van de oost-raai. De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .23 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

¹ nummering uit Rijkswaterstaat (Dienst Getijdewateren) nota GWWS - 88.008

" Golfrandvoorwaarden Afsluitdijk ", E.C. Bouwmeester en J. Groos

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.26
α - bodemrijzing	-.12
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.80
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.17
α - windopzet (incl. getij)	.51
α - H_s (diep water)	.00

Tabel 6.1 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s oostkant (geul) Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de significante golfhoogte aan de oostkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk, nabij geul) wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheden in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de windopzet (incl. getij). De onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) heeft een matige invloed.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai is vrijwel konstant (ongeveer 0.23 m, Fig. 6.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.5. De genormeerde bijdragen in de onzekerheden langs de raai variëren vrijwel niet: de situatie voor wat betreft de onzekerheden aan de teen van de dijk is karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.12
bodemrijzing	-.22
windsnelheid	.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.23
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.2 De gevoeligheden van de significante golfhoogte aan de oostkant van de Afsluitdijk

6.1.2 Midden-raai

In de basissituatie neemt de significante golfhoogte H_s af van 6.5 m buiten de Waddeneilanden tot 2.17 m voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de midden-raai (Fig. 6.4). De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .22 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.16
α - bodemrijzing	-.08
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.85
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.17
α - windopzet (incl. getij)	.47
α - H_s (diep water)	.00

Tabel 6.3 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s bij midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

Evenals aan de oostkant van de dijk (d.w.z. bij de geul) wordt de onzekerheid in de significante golfhoogte in het midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk) in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is vrij gering.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai blijft vrijwel constant (ongeveer 0.23 m, Fig. 6.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.6. De onzekerheden langs de raai variëren (evenals aan de oostkant van de dijk bij de geul) vrijwel niet: de situatie voor wat betreft de onzekerheden aan de teen van de dijk is karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.07
bodemrijzing	-.16
windsnelheid	-.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.21
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.4 De gevoeligheden van de significante golfhoogte bij midden van de Afsluitdijk

6.1.3 West-raai

In de basissituatie neemt de significante golfhoogte H_s af van 6.5 m buiten de Waddeneilanden tot 1.94 m voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 6.4). De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .20 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.18
α - bodemrijzing	-.13
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.85
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.22
α - windopzet (incl. getij)	.42
α - H_s (diep water)	-.01

Tabel 6.5 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s westkant Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de significante golfhoogte aan de westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt, evenals overal elders langs de dijk in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij). De invloed van de onzekerheden in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) en de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) is vrij gering.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai is vrijwel constant (ongeveer 0.21 m, Fig. 6.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.7. Evenals overal elders langs de Afsluitdijk variëren de onzekerheden langs de raai vrijwel niet: de situatie voor wat betreft de onzekerheden aan de teen van de dijk is karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.07
bodemrijzing	-.22
windsnelheid	.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.17
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.26

Tabel 6.6 De gevoeligheden van de significante golfhoogte aan de westkant van de Afsluitdijk

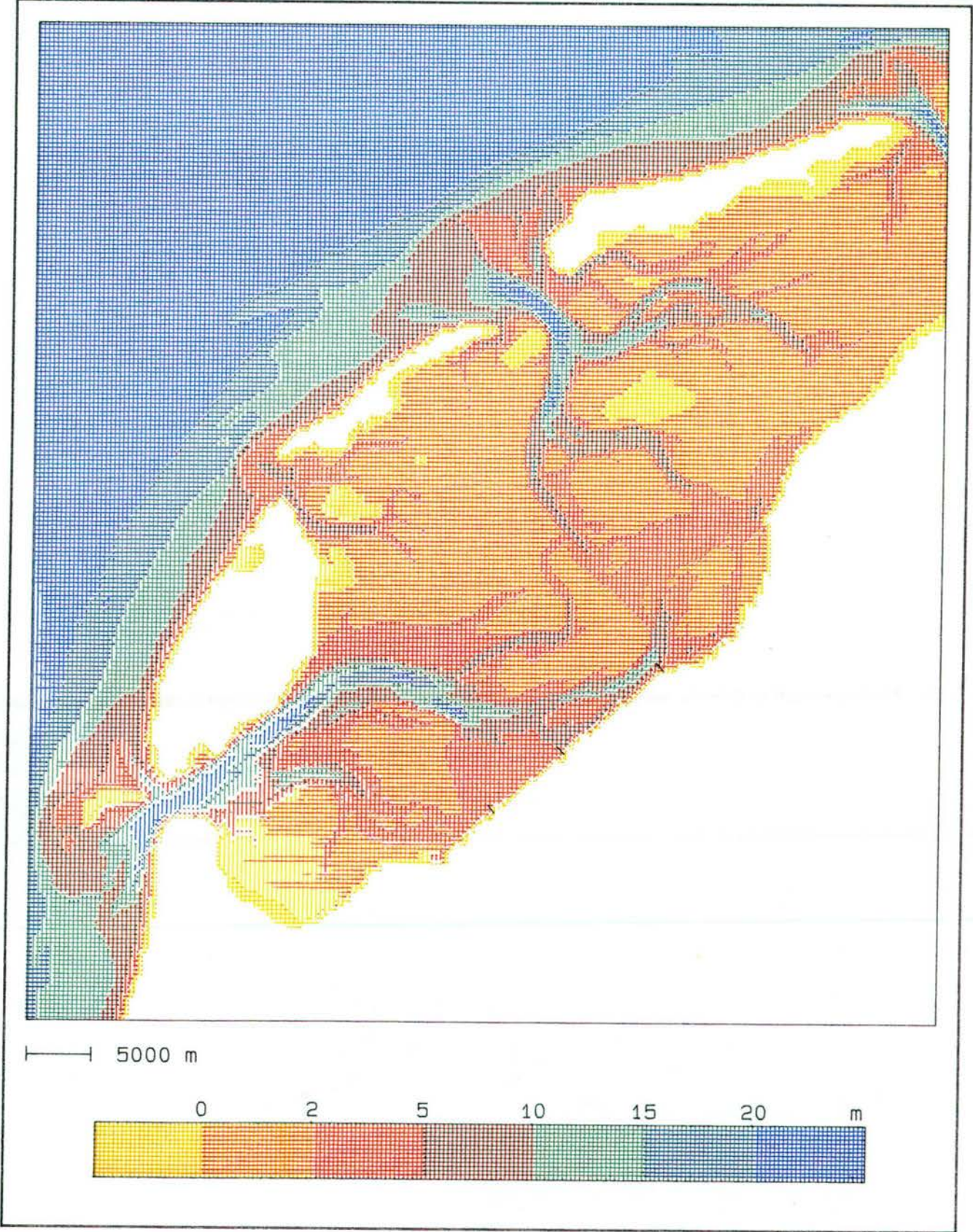


Fig. 6.1 De bodemtopografie van de Waddenzee, bodemligging t.o.v. NAP in m.

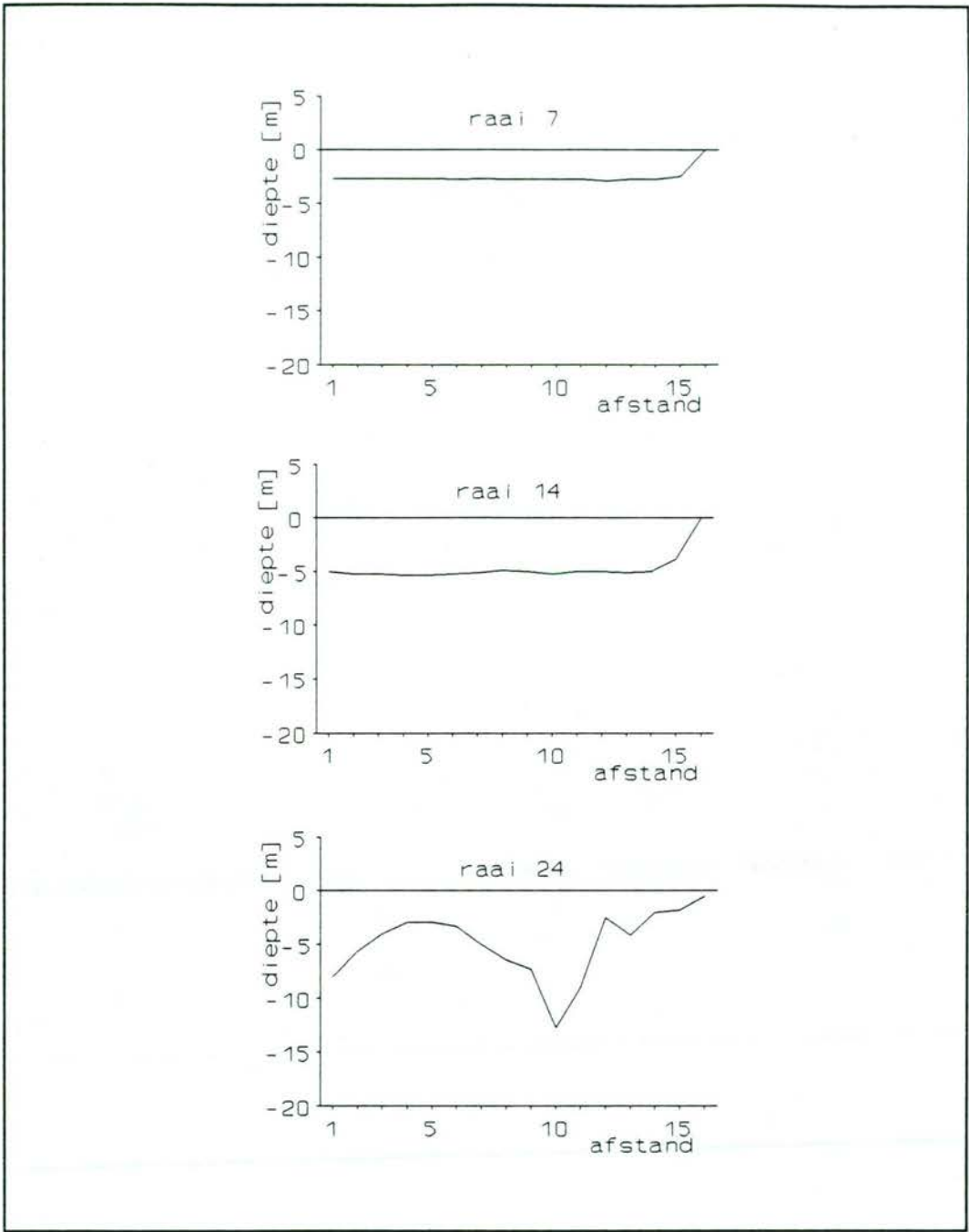


Fig. 6.2 Het verloop van de bodemligging langs de raaien loodrecht op de Afsluitdijk (t.o.v. NAP). Horizontaal is uitgezet de afstand (aantal gridpunten) langs de raai, verticaal is uitgezet de diepte in m.

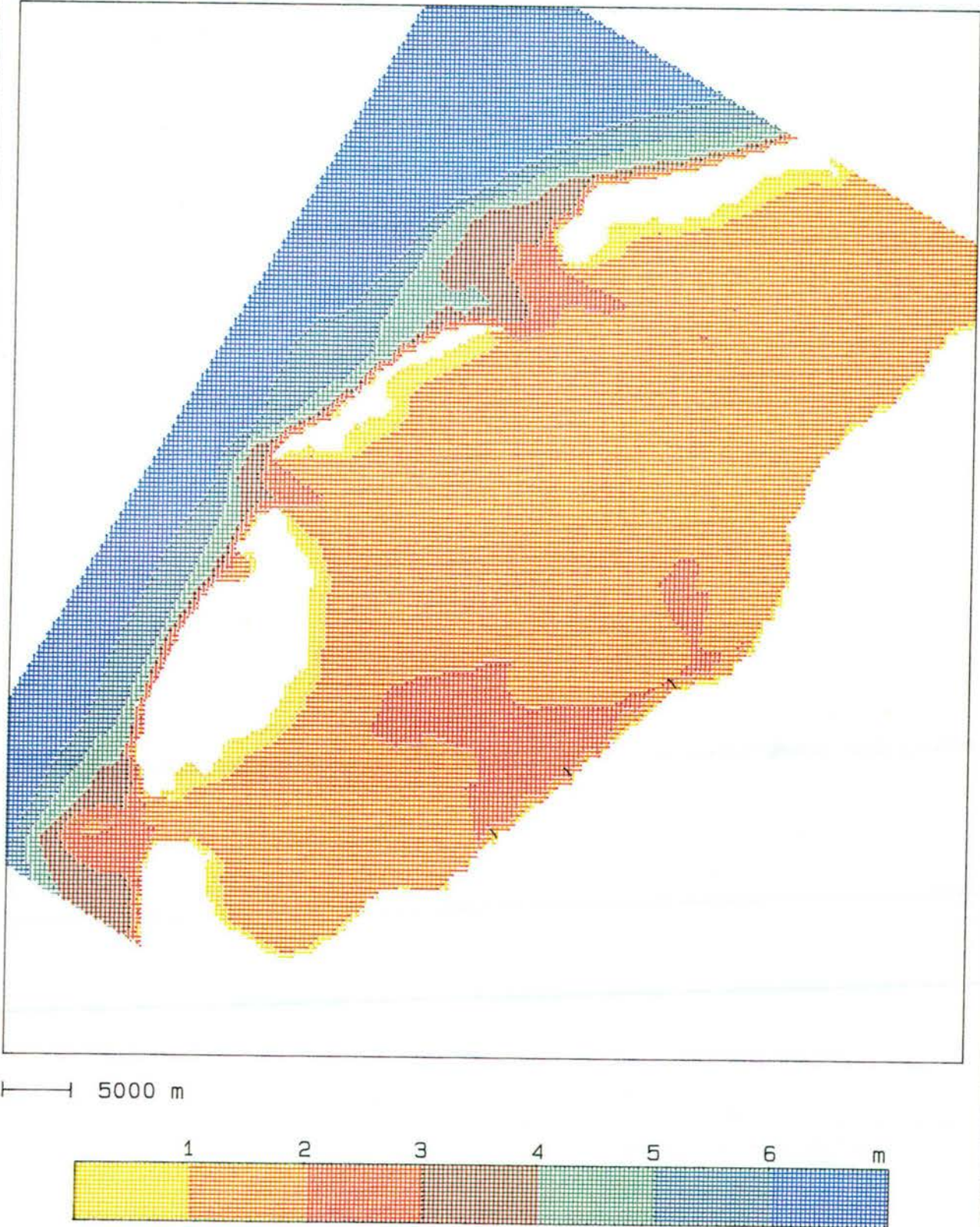


Fig. 6.3 De significante golfhoogte in de basissituatie in de Waddenzee (in m).

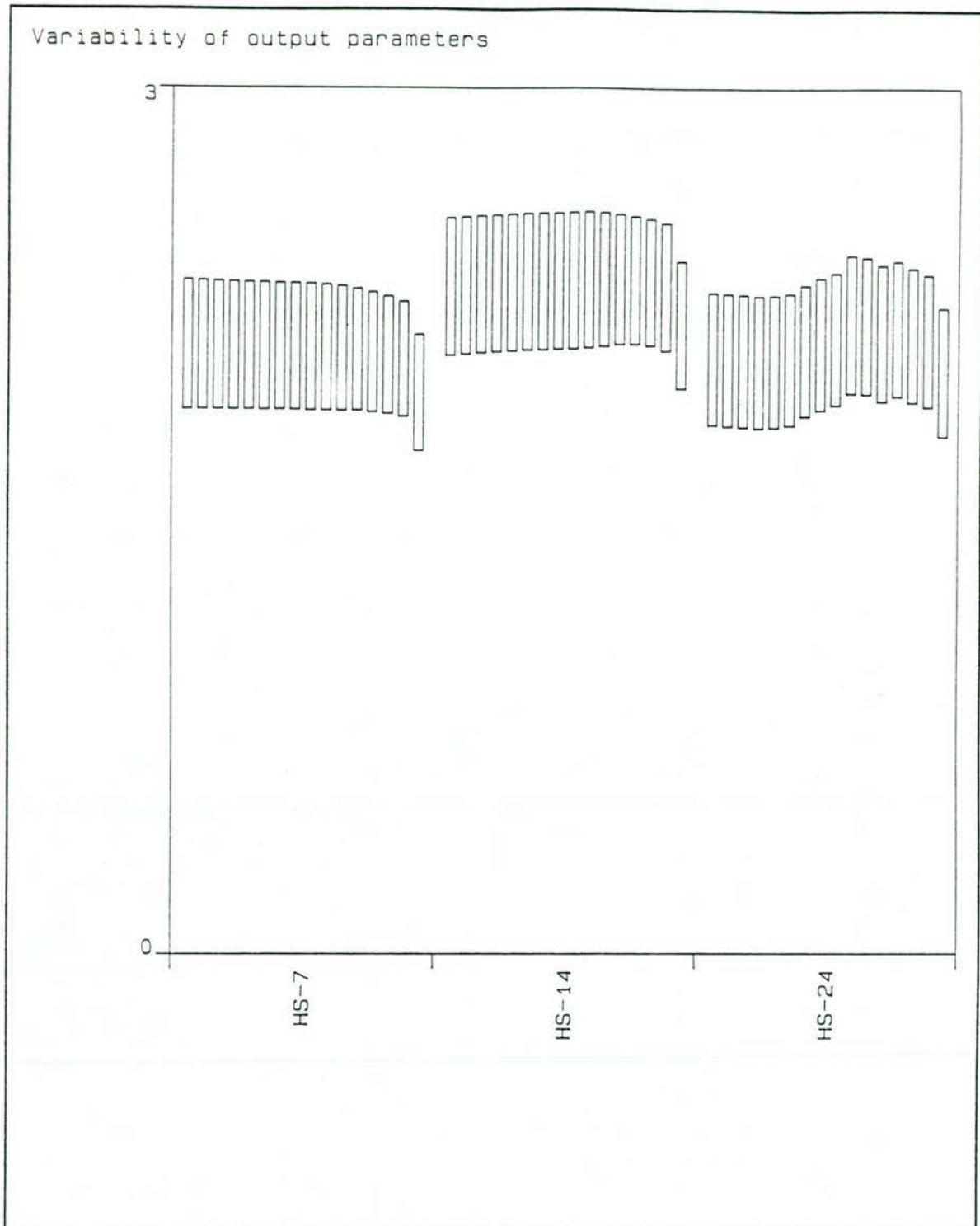


Fig. 6.4 Het verloop van de significante golfhoogte in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Afsluitdijk raaien (7 = westraai (rechts is dijk), 14 = midden-raai (rechts is dijk) en 24 = oost-raai (rechts is dijk)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 6.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaardafwijking van de totale onzekerheid (in m).

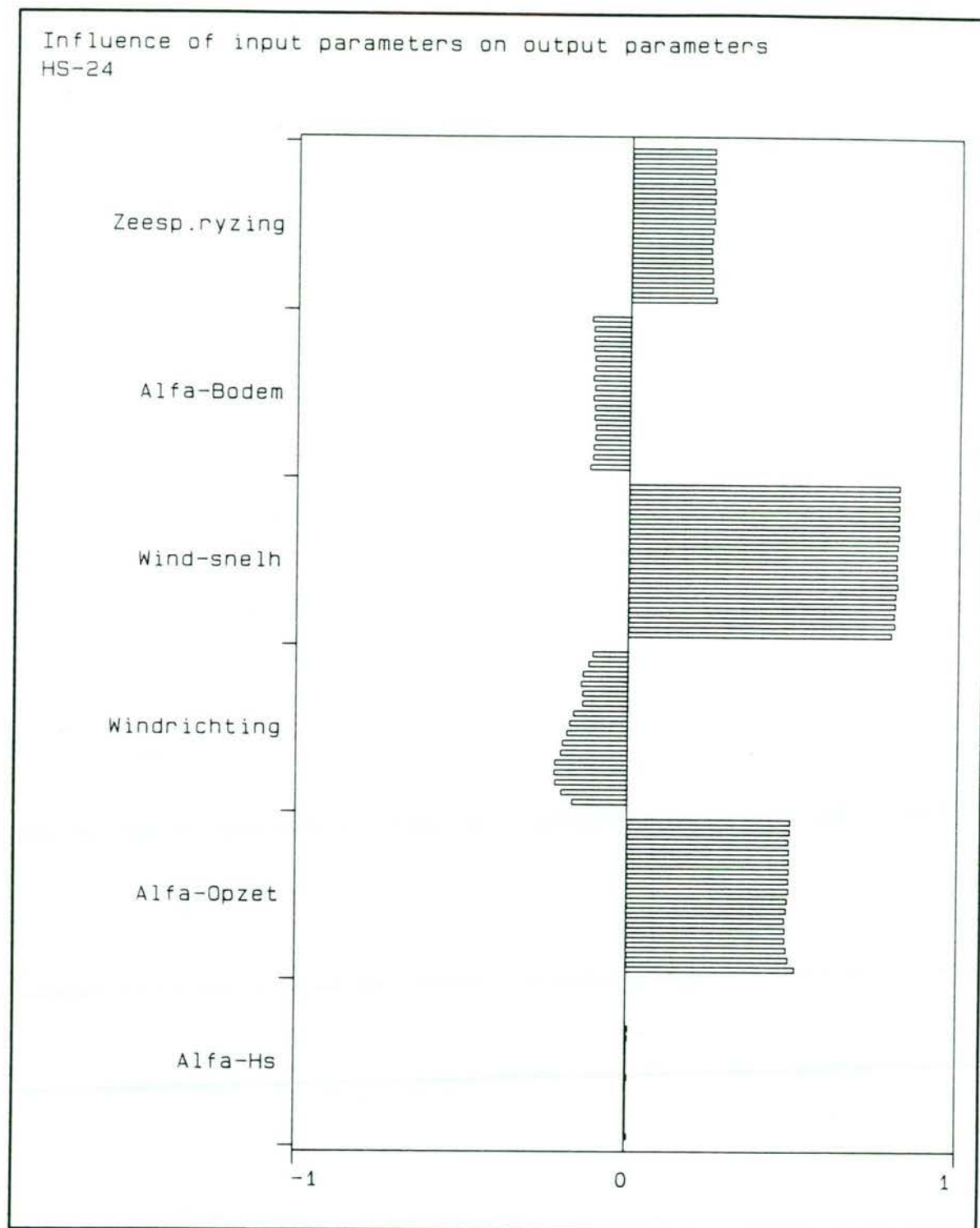


Fig. 6.5 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

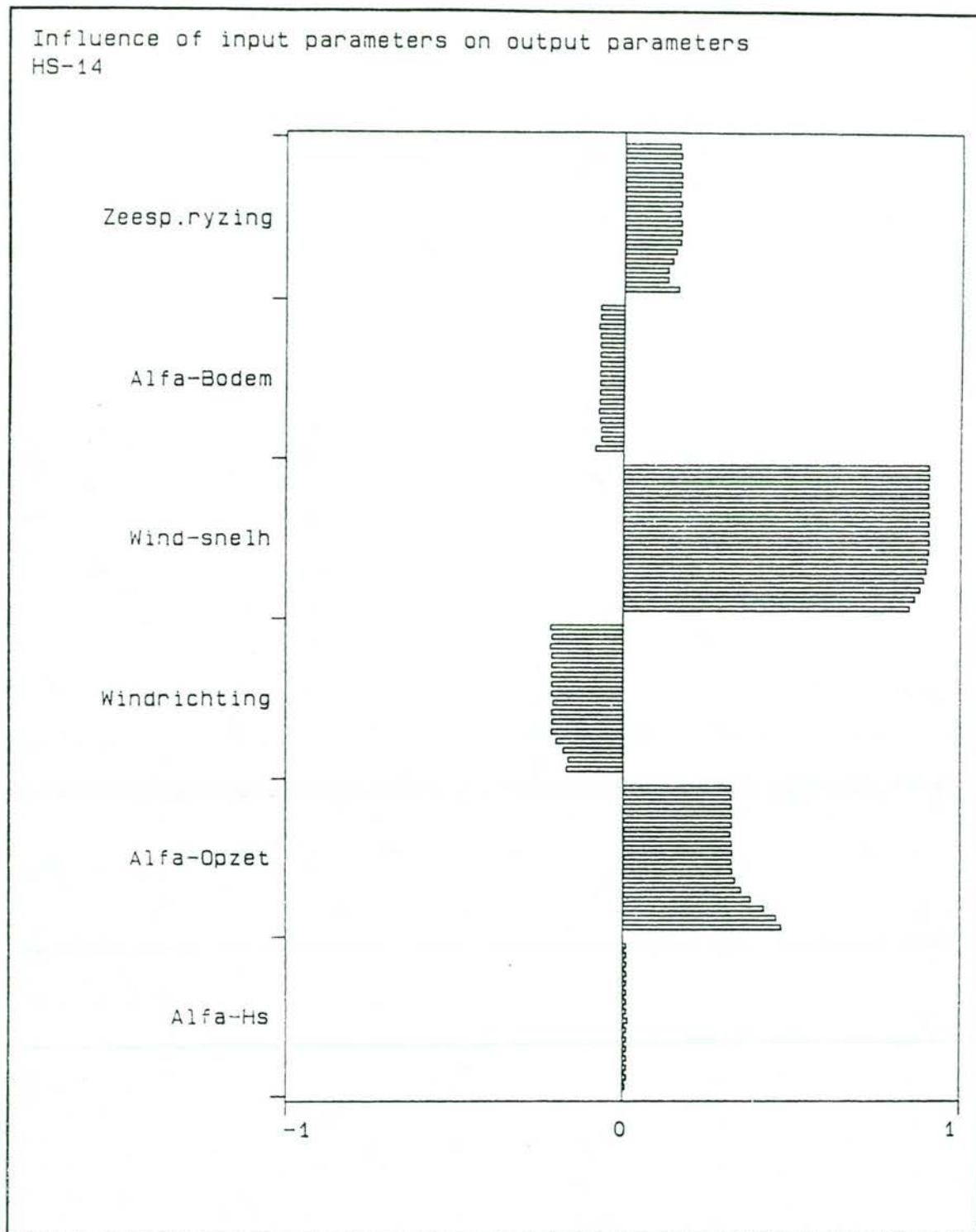


Fig. 6.6 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de midden-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

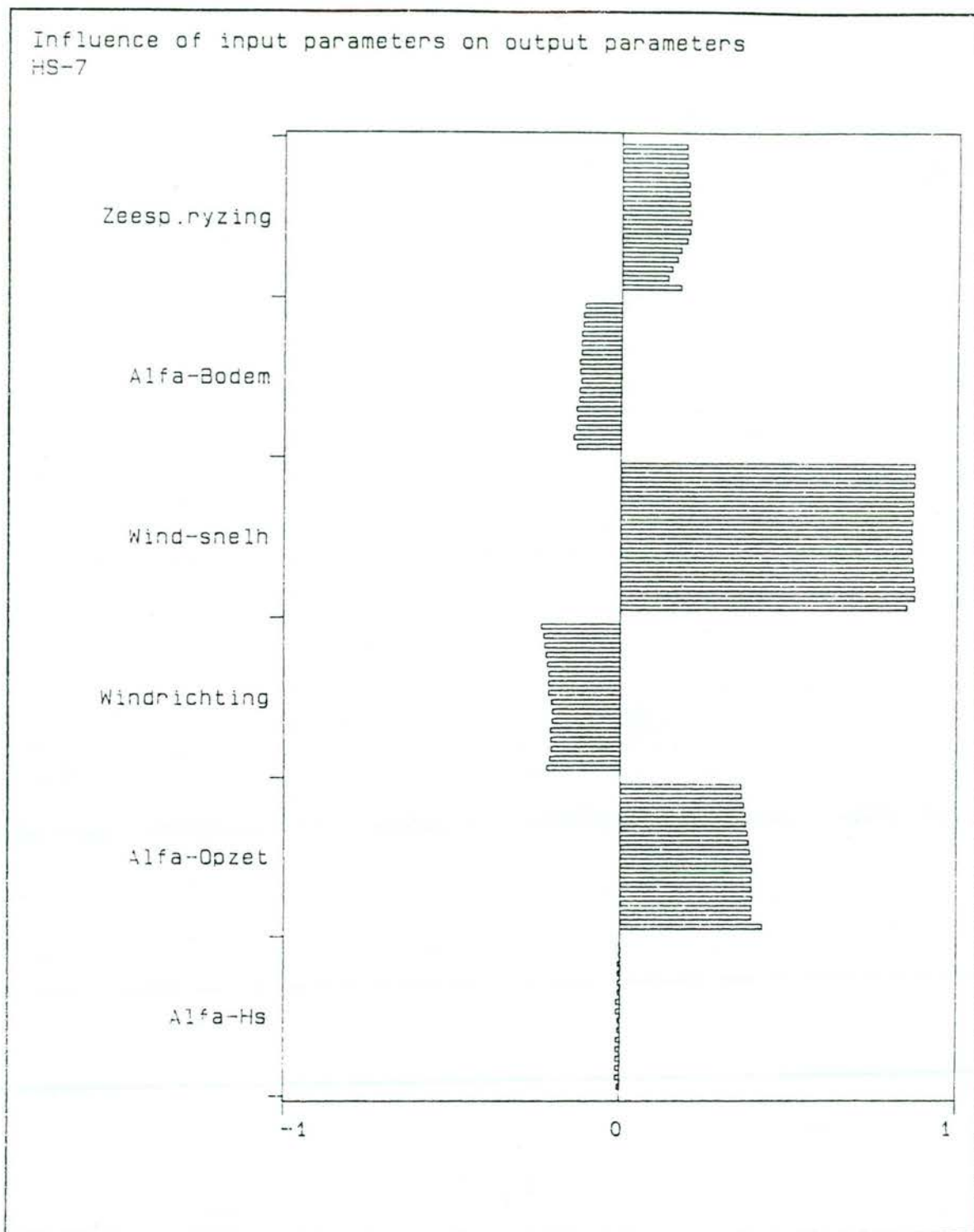


Fig. 6.7 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

6.2 Gemiddelde golfperiode

6.2.1 Oost-raai

In de basissituatie (Fig. 6.8 en 6.9) neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ af van 9.6 s m buiten de Waddeneilanden tot 4.3 s voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (Fig. 6.9). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt .25 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.27
α - bodemrijzing	-.11
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.81
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.00
α - windopzet (incl. getij)	.51
α - H_s (diep water)	.01

Tabel 6.7 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ oostkant (geul) Afsluitdijk (teen van de dijk).

Uit deze tabel blijkt dat de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aan de oostkant van de Afsluitdijk (d.w.z bij de geul) in belangrijke mate bepaald wordt door onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en in de schatting van de windopzet (incl. getij). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is matig.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai is vrijwel konstant (ongeveer 0.23 s, Fig. 6.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.10. Ze zijn vrijwel konstant.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.14
bodemrijzing	-.22
windsnelheid	.07
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.25
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.8 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode aan de oostkant van de Afsluitdijk

6.2.2 Midden-raai

In de basissituatie neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ af van 9.6 s buiten de Waddeneilanden tot 4.7 s voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de midden-raai (Fig. 6.9). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt .25 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.30
α - bodemrijzing	-.14
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.94
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.00
α - windopzet (incl. getij)	.06
α - H_s (diep water)	.00

Tabel 6.9 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ bij midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

Evenals aan de oostkant van de Afsluitdijk wordt de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode in het midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk) met name bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) heeft een matige invloed.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai is vrijwel constant (ongeveer 0.24 s, Fig. 6.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.11. Opvallend is dat de invloed van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) die toeneemt naar dieper water. Overigens is de situatie voor wat betreft de onzekerheden aan de teen van de dijk is karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.15
bodemrijzing	-.30
windsnelheid	-.08
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.03
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.10 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode bij midden van de Afsluitdijk

6.2.3 West-raai

In de basissituatie neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ af van 9.6 m buiten de Waddeneilanden tot 4.3 s voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 6.9). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt .28 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.39
α - bodemrijzing	-.08
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.77
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.09
α - windopzet (incl. getij)	.48
α - H_s (diep water)	.00

Tabel 6.11 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode H_s westkant Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aan de westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt, evenals overal elders langs de Afsluitdijk, met name bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De onzekerheden in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) en de schatting van de windopzet (getij) zijn niet onbelangrijk.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai is vrijwel konstant (ongeveer 0.25 s, Fig. 6.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.12. Opvallend is de variatie in de invloed van de meeste onzekerheden nabij de teen van de dijk. Daarbij is de invloed van de windrichting tegengesteld aan die in het midden van de Afsluitdijk.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.22
bodemrijzing	-.19
windsnelheid	.07
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.27
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.12 De gevoelheden van de gemiddelde golfperiode aan de westkant van de Afsluitdijk

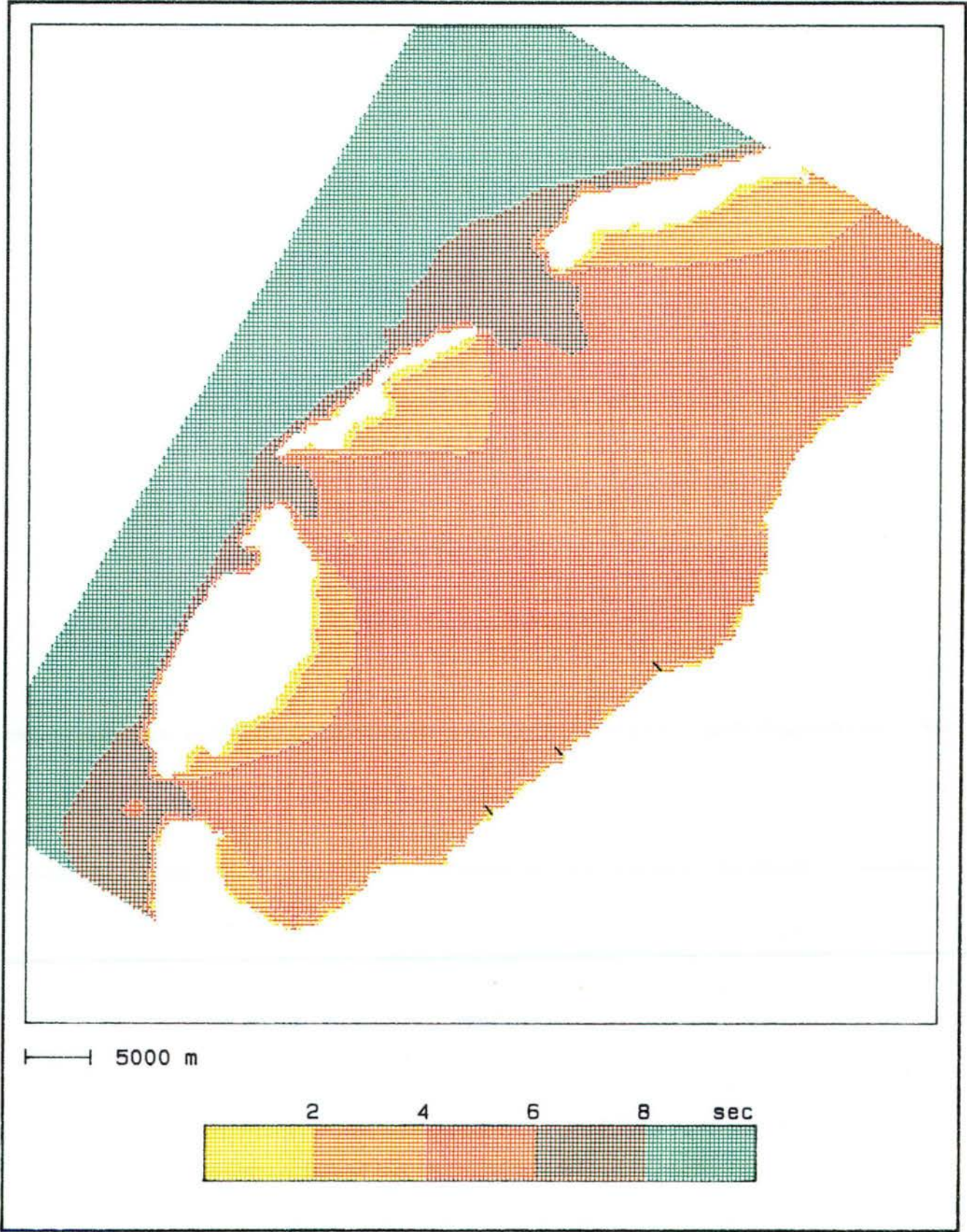


Fig. 6.8 De gemiddelde golfperiode in de basissituatie in de Waddenzee (in s).

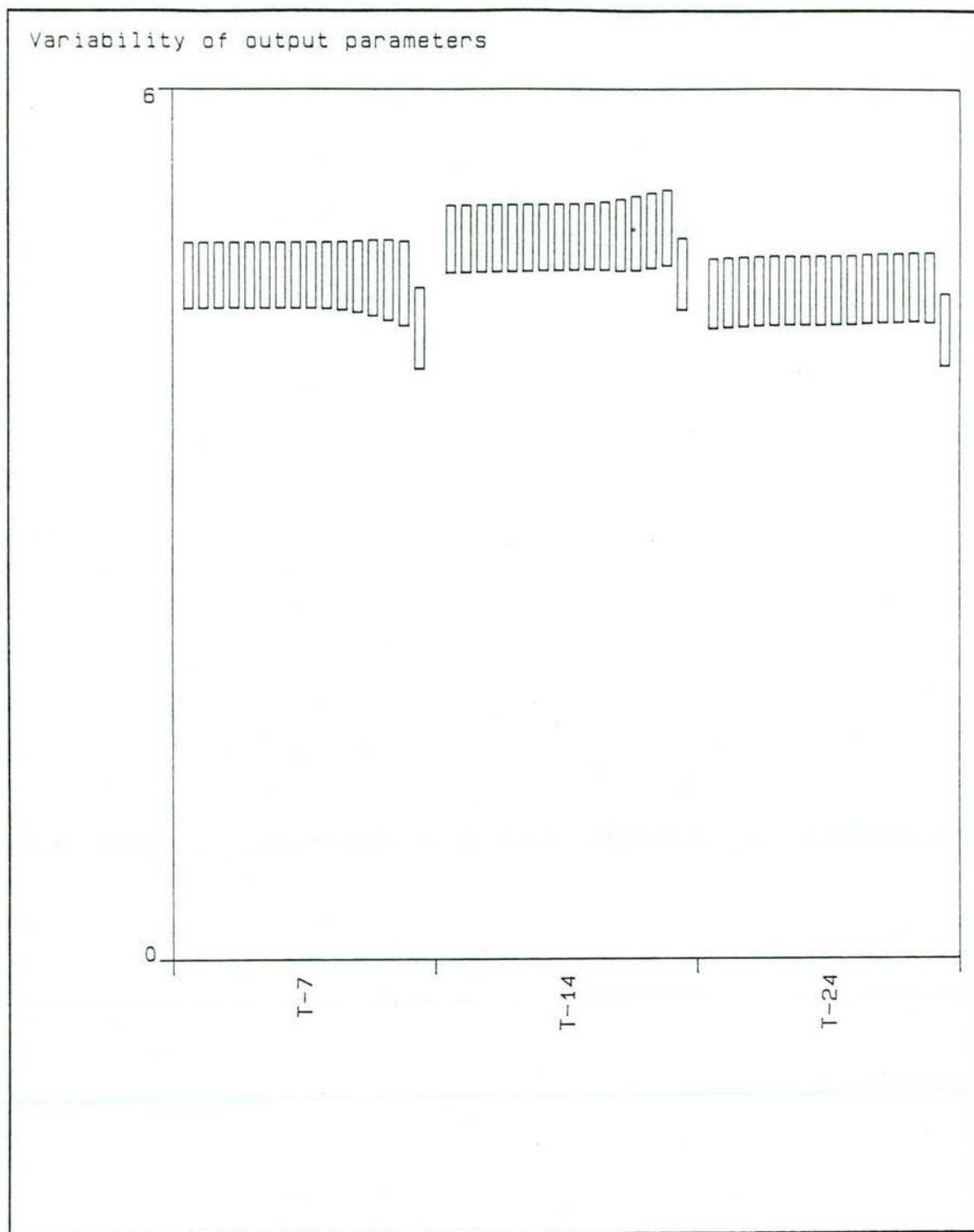


Fig. 6.9 Het verloop van de gemiddelde golfperiode in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Afsluitdijk raaien (7 = westraai (rechts is dijk), 14 = midden-raai (rechts is dijk) en 24 = oost-raai (rechts is dijk)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 6.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaardafwijking van de totale onzekerheid (in s).

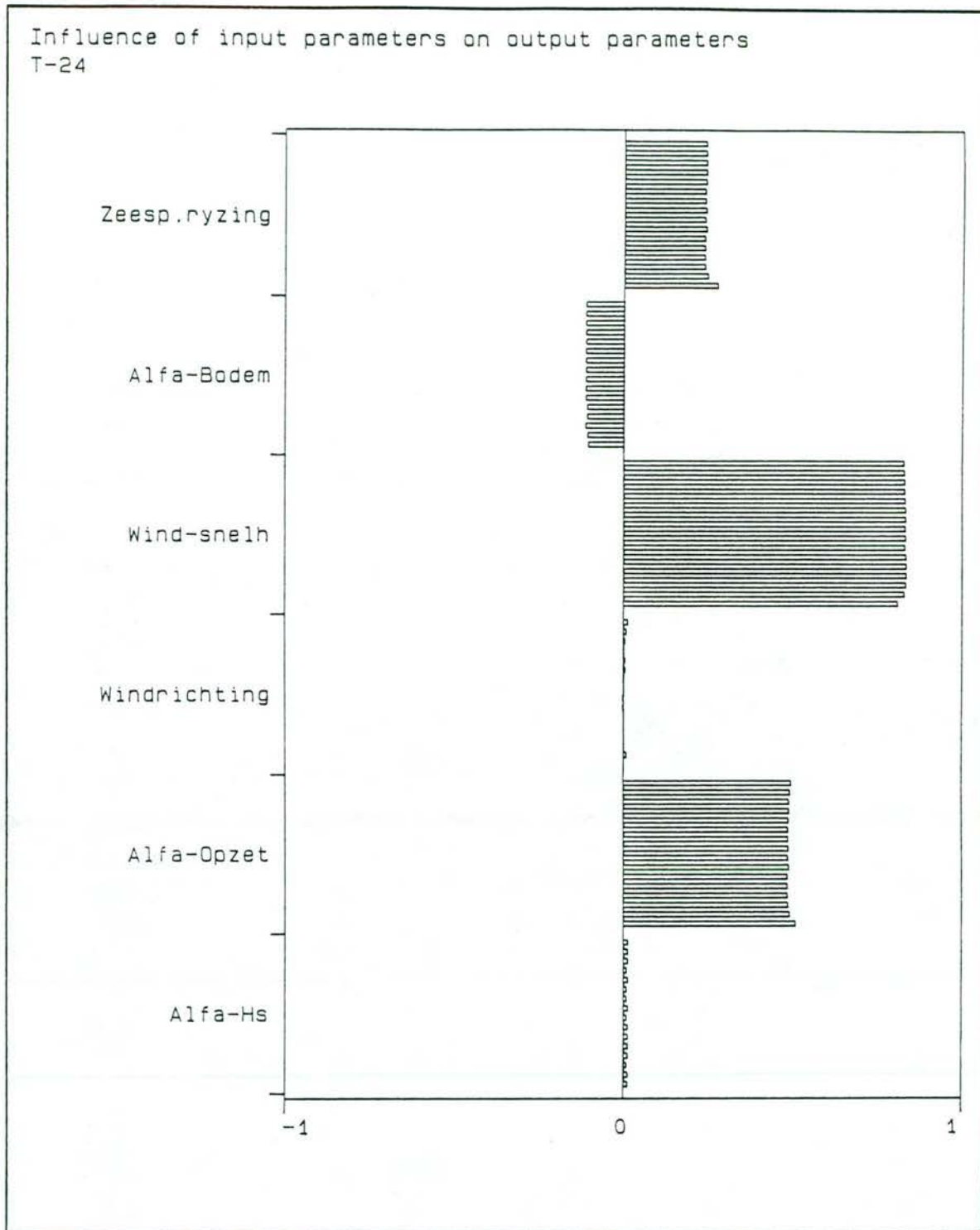


Fig. 6.10 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

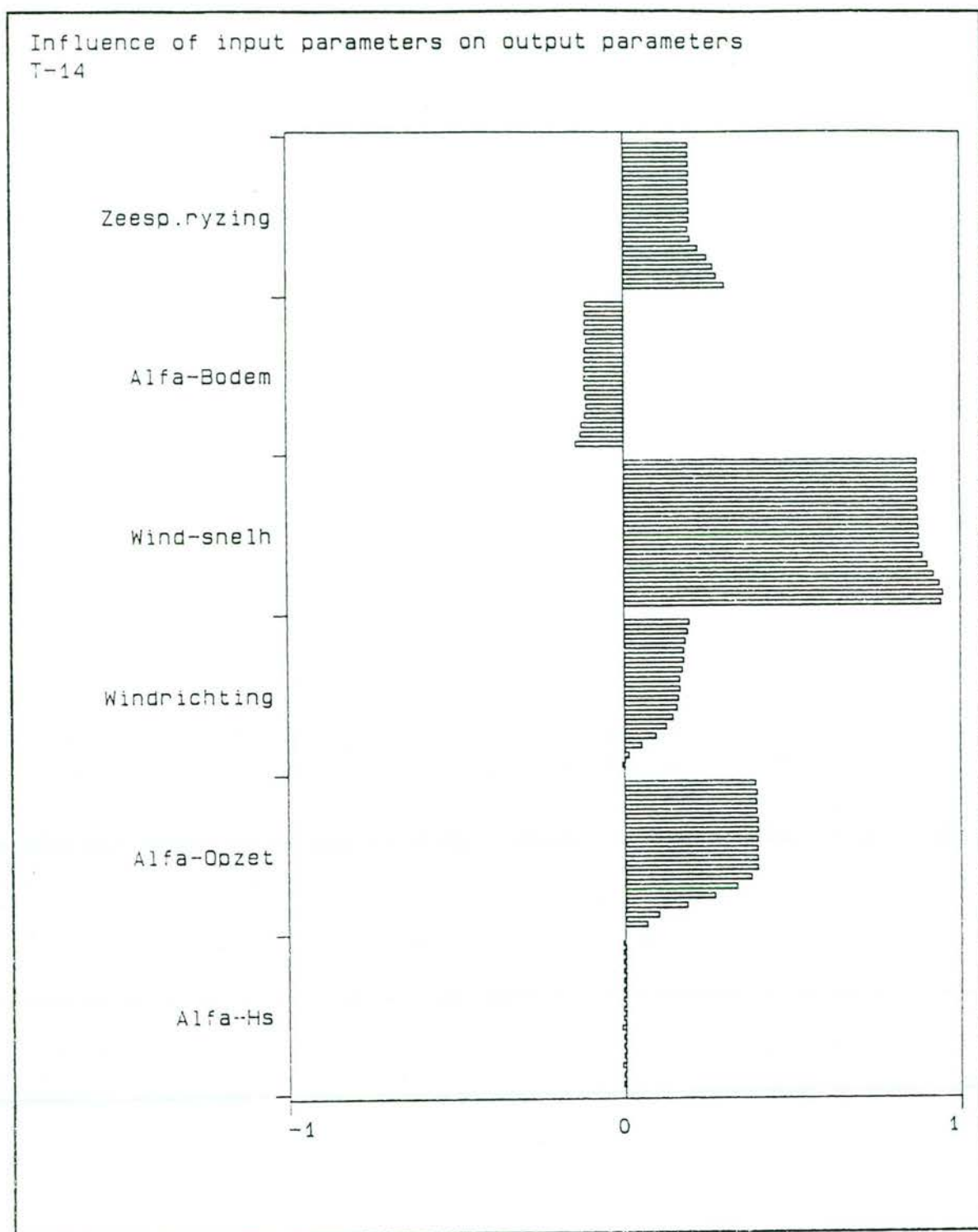


Fig. 6.11 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de midden-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

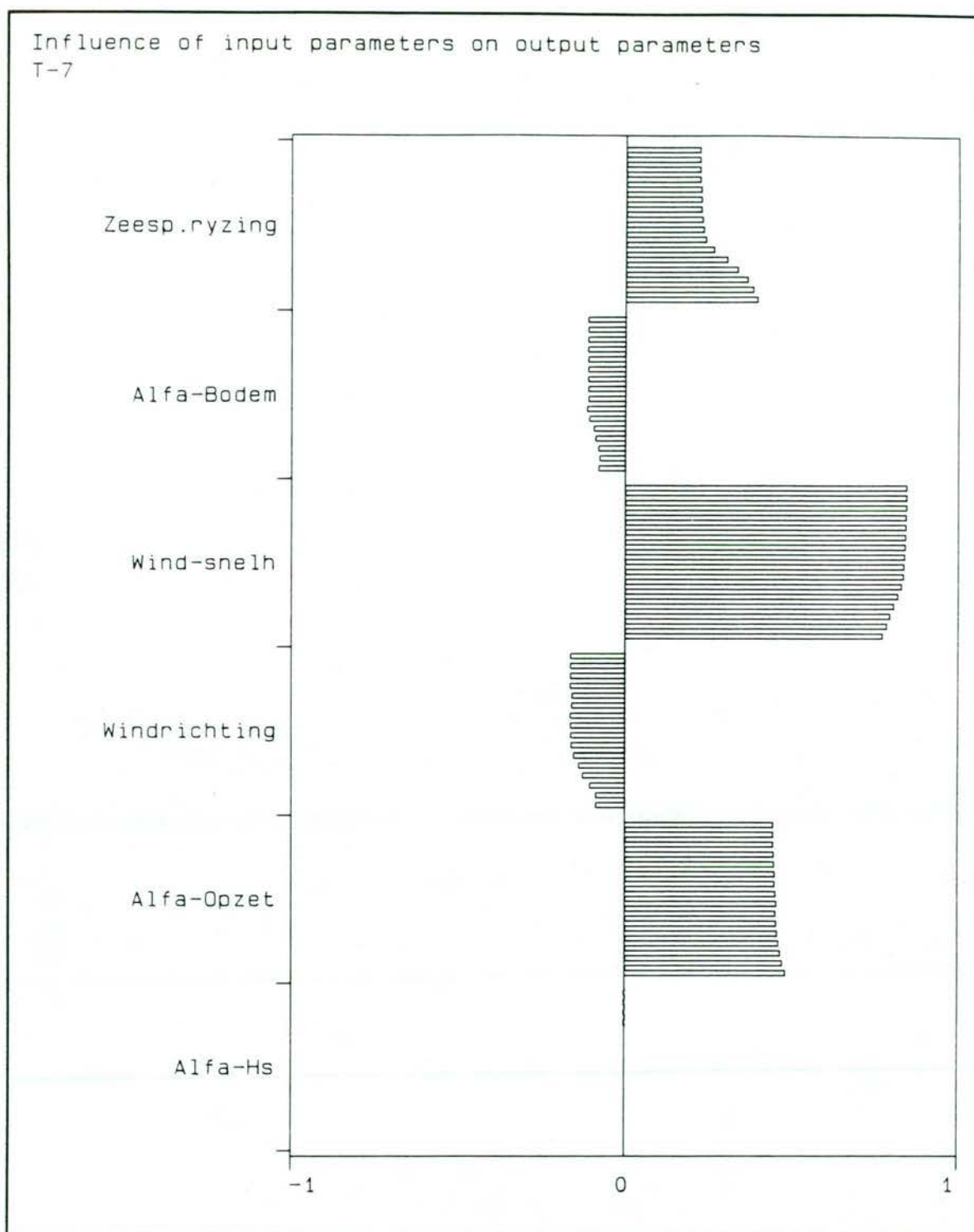


Fig. 6.12 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

6.3 Gemiddelde golfrichting

6.3.1 Oost-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ vrijwel niet van buiten de Waddeneilanden naar de Afsluitdijk ter plaatse van de oost-raai (van 315° naar 314°) (Fig. 6.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar bedraagt 6° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.02
α - bodemrijzing	-.02
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + T diepwater)	-.04
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.99
α - windopzet (incl. getij)	.05
α - H_s (diep water)	.01

Tabel 6.13 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ bij oostkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aan de oostkant wordt blijkbaar gedomineerd door de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de overige parameters (dus ook de zeespiegelrijzing) is nihil.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai neemt af van 8° in dieper water tot 6° bij de dijk (Fig. 6.13).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.14. De onzekerheden langs de raai variëren 2vrijwel niet: de situatie voor wat betreft de onzekerheden aan de teen van de dijk is karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.20
bodemrijzing	-.83
windsnelheid	-.07
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.40
windopzet (incl. getij)	.64
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.09

Tabel 6.14 De gevoelheden van de gemiddelde golfrichting aan de oostkant van de Afsluitdijk

6.3.2 Midden-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ niet van buiten de Waddeneilanden (NW = 315°) naar de Afsluitdijk ter plaatse van de midden-raai (Fig. 6.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar bedraagt 7° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.04
α - bodemrijzing	-.02
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.06
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.99
α - windopzet (incl. getij)	-.12
α - H_s (diep water)	.00

Tabel 6.15 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ bij midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting in het midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt blijkbaar, evenals bij de oost-raai, volledig gedomineerd door de windrichting(incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de overige omgevingsparameters (o.a. de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is

verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai neemt (kort voor de teen van de dijk) enigszins af van 9° in dieper water tot 7° bij de teen van de dijk (Fig. 6.13).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.15. De constante dominantie van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) is evident: in dit opzicht is de situatie aan de teen van de dijk karakteristiek voor het hele voorland van de dijk.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.58
bodemrijzing	-1.33
windsnelheid	.13
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.44
windopzet (incl. getij)	-1.56
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.00

Tabel 6.16 De gevoeligheden van de gemiddelde golfrichting bij midden van de Afsluitdijk

6.3.3 West-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ vrijwel niet van buiten de Waddeneilanden (d.w.z. 20 m waterdiepte) naar de Afsluitdijk ter plaatse van de west-raai (van 315° naar 318°) (Fig. 6.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar bedraagt 8° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.08
α - bodemrijzing	-.04
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.02
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.99
α - windopzet (incl. getij)	.04
α - H_s (diep water)	-.03

Tabel 6.17 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ bij westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aan de westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt, evenals overall elders langs de Afsluitdijk, bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de overige omgevingsparameters (dus ook de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai fluctueert rond de 10° (Fig. 6.13).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.16. Ook hier (evenals elders langs de dijk) blijft de invloed van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) domineren langs de raai.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial\bar{\theta}/\partial Z_i$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	1.28
bodemrijzing	-2.50
windsnelheid	.07
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.55
windopzet (incl. getij)	.62
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.32

Tabel 6.18 De gevoelheden van de gemiddelde golfrichting aan de westkant van de Afsluitdijk

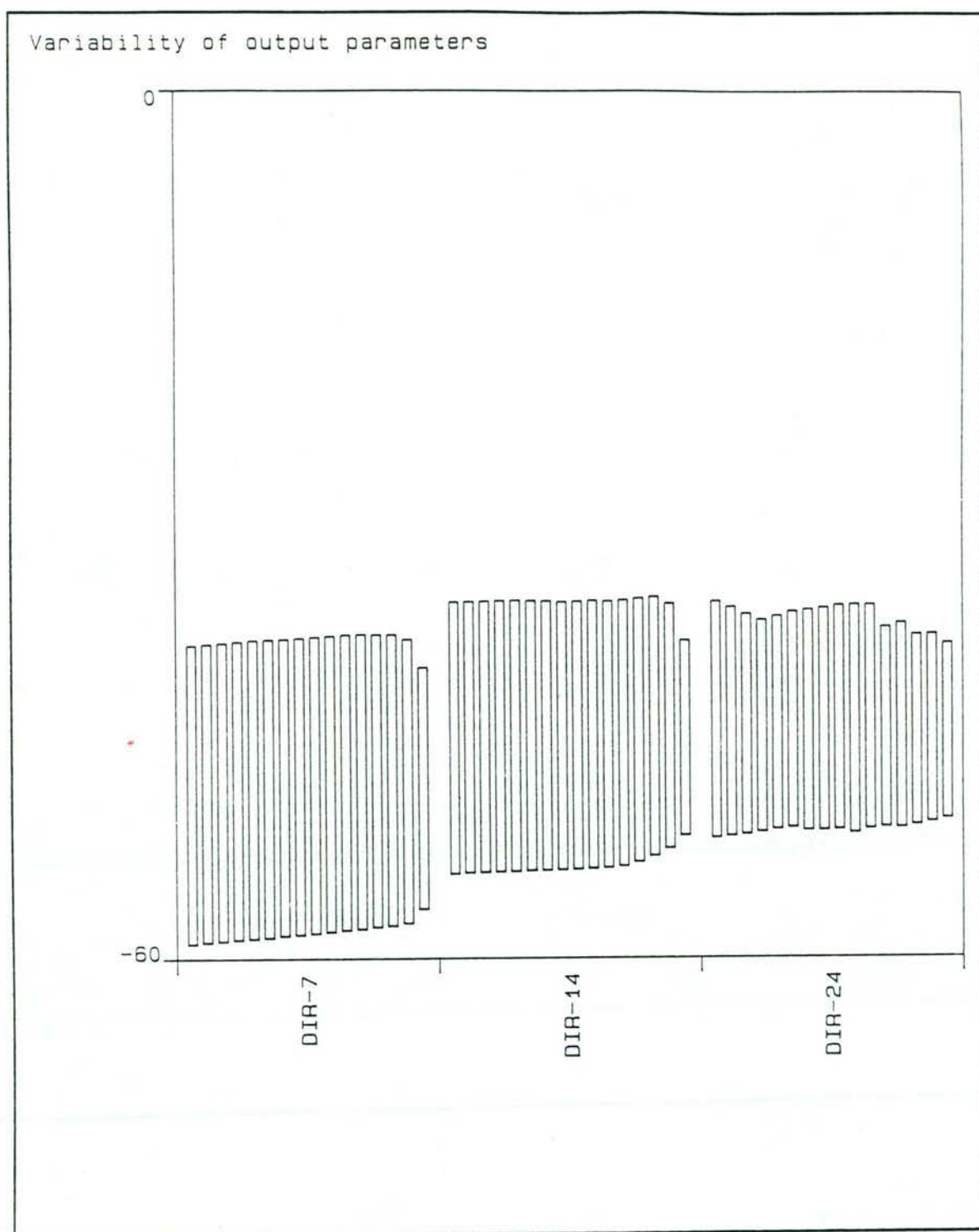


Fig. 6.13 Het verloop van de gemiddelde golfrichting (Cartesische conventie van HISWA) in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Afsluitdijk raaien (7 = westraai (rechts is dijk), 14 = midden-raai (rechts is dijk) en 24 = oost-raai (rechts is dijk)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 6.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

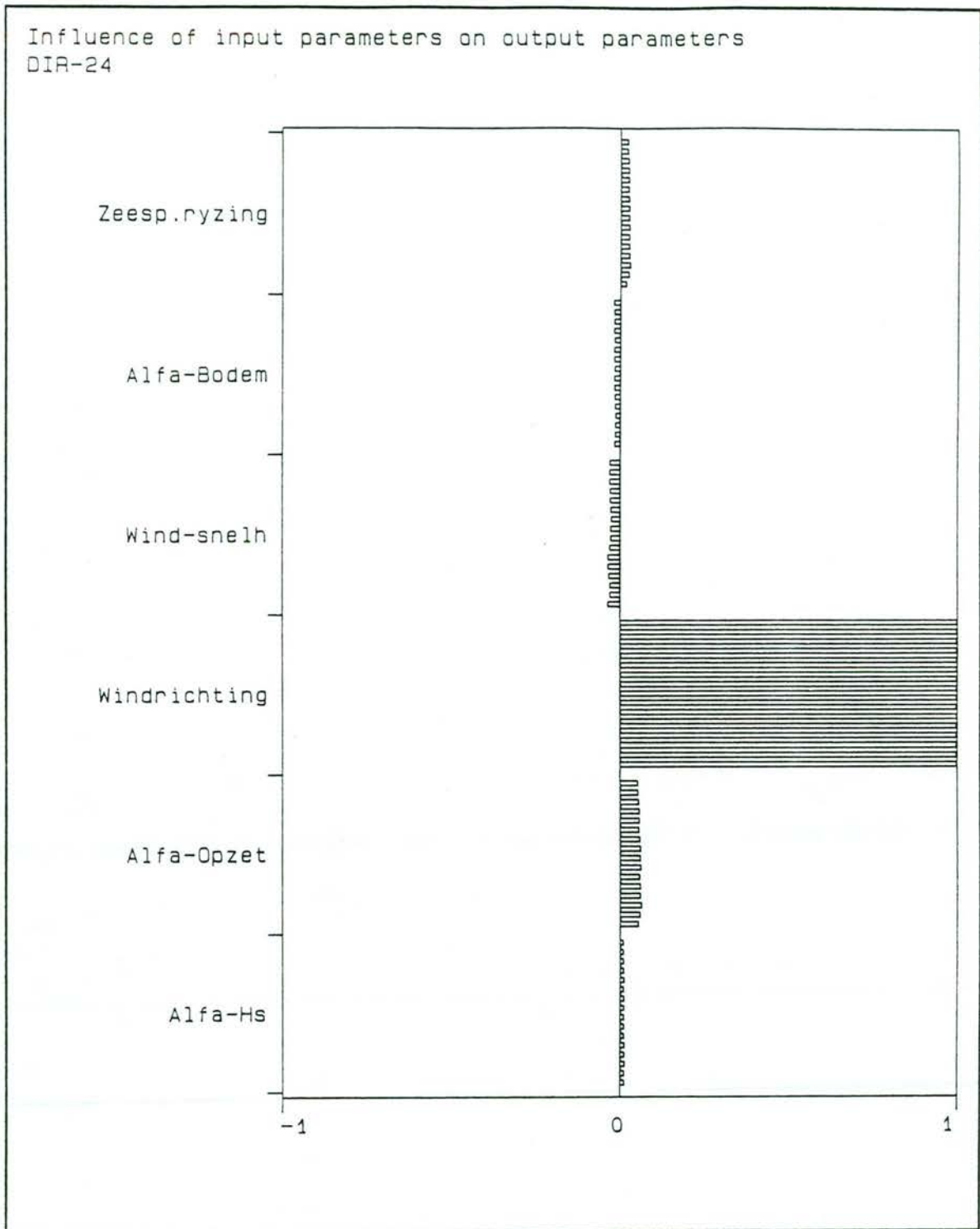


Fig. 6.14 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

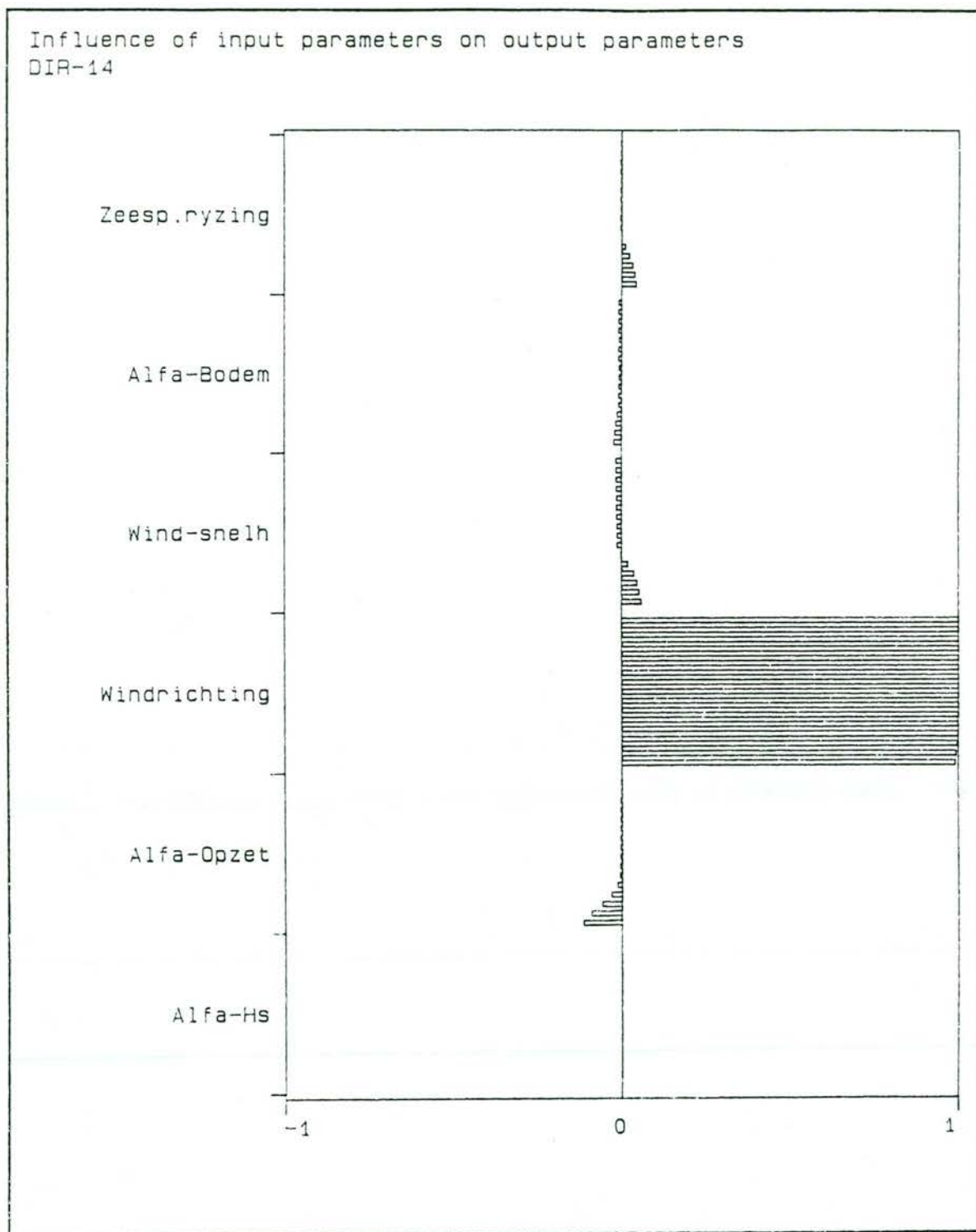


Fig. 6.15 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de midden-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

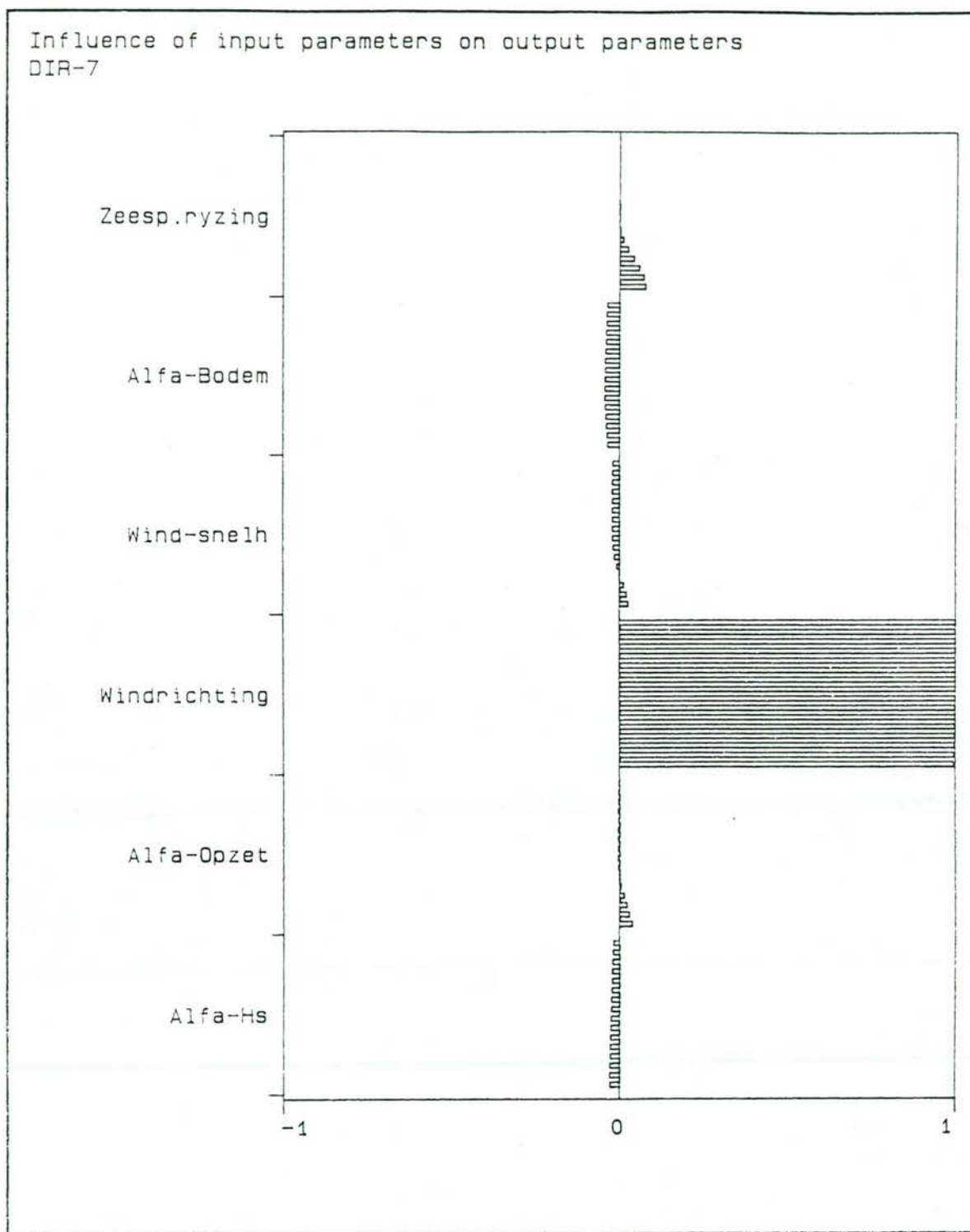


Fig. 6.16 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

6.4 Golfrichtingsspreiding

6.4.1 Oost-raai

In de basissituatie neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ af van 30° buiten de Waddeneilanden naar 22.5° voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (Fig. 6.17). De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar bedraagt slechts 0.3° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ oost Afsluitdijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.23
α - bodemrijzing	-.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.03
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.84
α - windopzet (incl. getij)	.46
α - H_s (diep water)	-.06

Tabel 6.19 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ bij oostkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aan de oostkant van de Afsluitdijk blijkt vooral bepaald te worden door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) en in de schatting van de windopzet (incl. getij).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai blijft zeer klein en varieert tussen 0.1° en 0.5° (Fig. 6.17).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.18. In tegenstelling tot de meeste andere situaties variëren de onzekerheden langs de raai tamelijk onregelmatig (waarschijnlijk ten gevolge van de kleine onzekerheid van minder dan 1°). De dominantie van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) is evident nabij de dijk maar de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) neemt de dominantie over in dieper water.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ Afsluitdijk oost
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.16
bodemrijzing	-.50
windsnelheid	-.00
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	-.02
windopzet (incl. getij)	.32
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.03

Tabel 6.20 De gevoelheden van de golfrichtingsspreiding aan de oostkant van de Afsluitdijk

6.4.2 Midden-raai

In de basissituatie (Fig. 6.17) neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ van 30° buiten de Waddeneilanden naar 19.6° voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de midden-raai. De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar bedraagt slechts .7° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ midden Afsluitdijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.13
α - bodemrijzing	-.01
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.13
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.57
α - windopzet (incl. getij)	.80
α - H_s (diep water)	.04

Tabel 6.21 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ bij midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De onzekerheid in de golfrichtingsspreiding in het midden van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt blijkbaar gedomineerd door de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij), gevolgd door de onzekerheid in windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de overige

omgevingsparameters (o.a. de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai blijft zeer klein en varieert tussen 0.5° en 0.7 ° (Fig. 6.17).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.19. Het meest opvallende is de snelle en drastische veranderingen vlak voor de dijk van de invloed van de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij) die snel vermindert (en van teken verandert), terwijl die van de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) snel toeneemt (overigens tegengesteld aan zijn invloed bij de oost-raai).

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ Afsluitdijk midden
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.20
bodemrijzing	-.08
windsnelheid	-.03
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.03
windopzet (incl. getij)	1.20
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.04

Tabel 6.22 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding bij het midden van de Afsluitdijk

6.4.3 West-raai

In de basissituatie neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ af van 30° buiten de Waddeneilanden naar 23.1° voor de Afsluitdijk aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 6.17). De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar bedraagt 0.8° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ west Afsluitdijk
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.55
α - bodemrijzing	-.34
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.23
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.59
α - windopzet (incl. getij)	-.37
α - H_s (diep water)	-.20

Tabel 6.23 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ bij westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk).

De golfrichtingsspreiding aan de westkant van de Afsluitdijk (teen van de dijk) wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) en door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai blijft zeer klein en varieert tussen 0.8° en 1° (Fig. 6.17).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 6.20. Het gedrag van de invloed van de verschillende onzekerheden is stabieler dan elders langs de dijk. Opvallend is weer de snelle veranderingen nabij de dijk (met name voor de onzekerheid in de schatting van de windopzet incl. getij).

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ Afsluitdijk west
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.86
bodemrijzing	-2.25
windsnelheid	-.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.03
windopzet (incl. getij)	-.58
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.20

Tabel 6.24 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding aan de oostkant van de Afsluitdijk

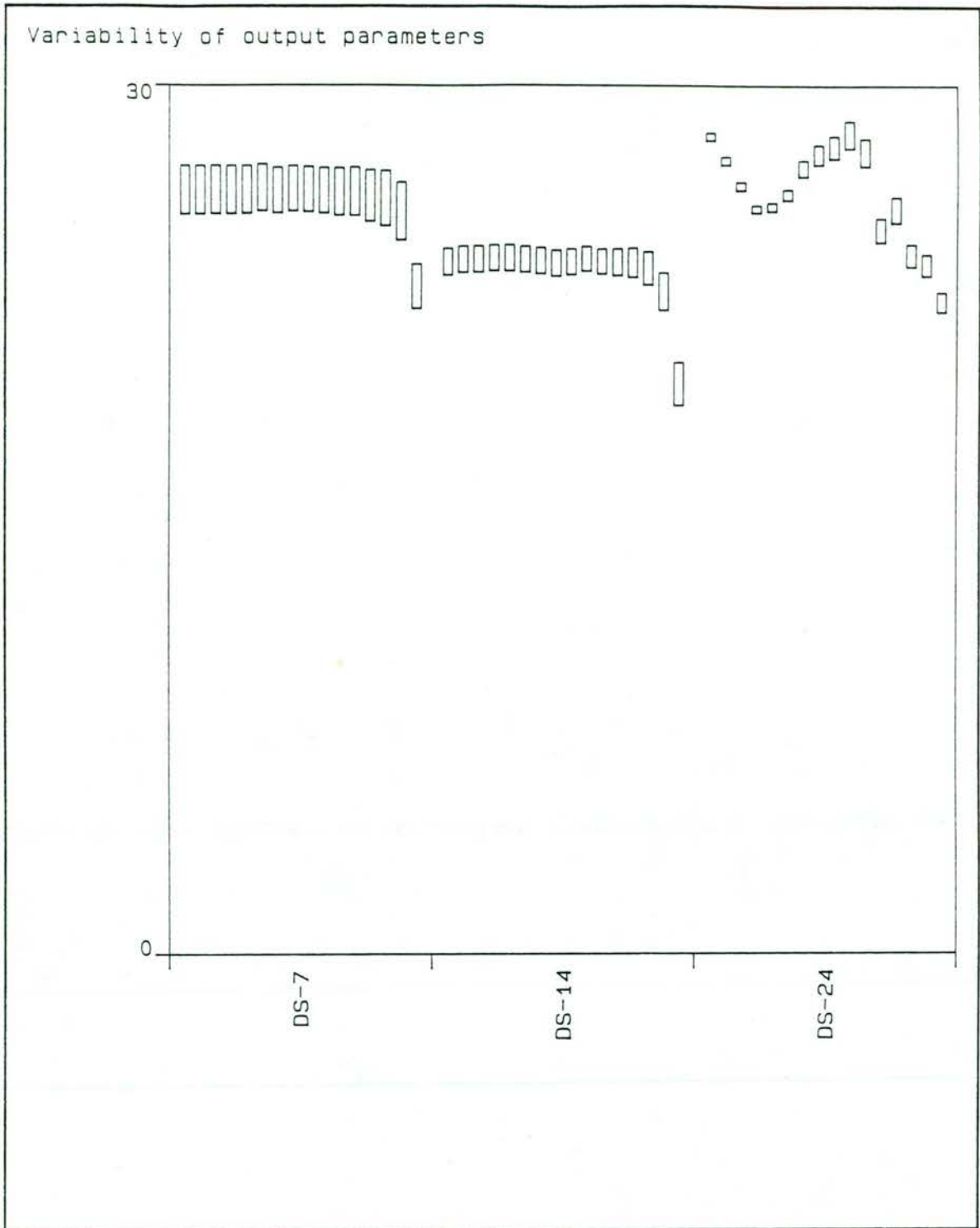


Fig. 6.17 Het verloop van de golfrichtingsspreiding in de basissituatie en de totale onzekerheid langs de Afsluitdijk raaien (7 = westraai (rechts is dijk), 14 = midden-raai (rechts is dijk) en 24 = oost-raai (rechts is dijk)). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 6.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaardafwijking van de totale onzekerheid (in $^{\circ}$).

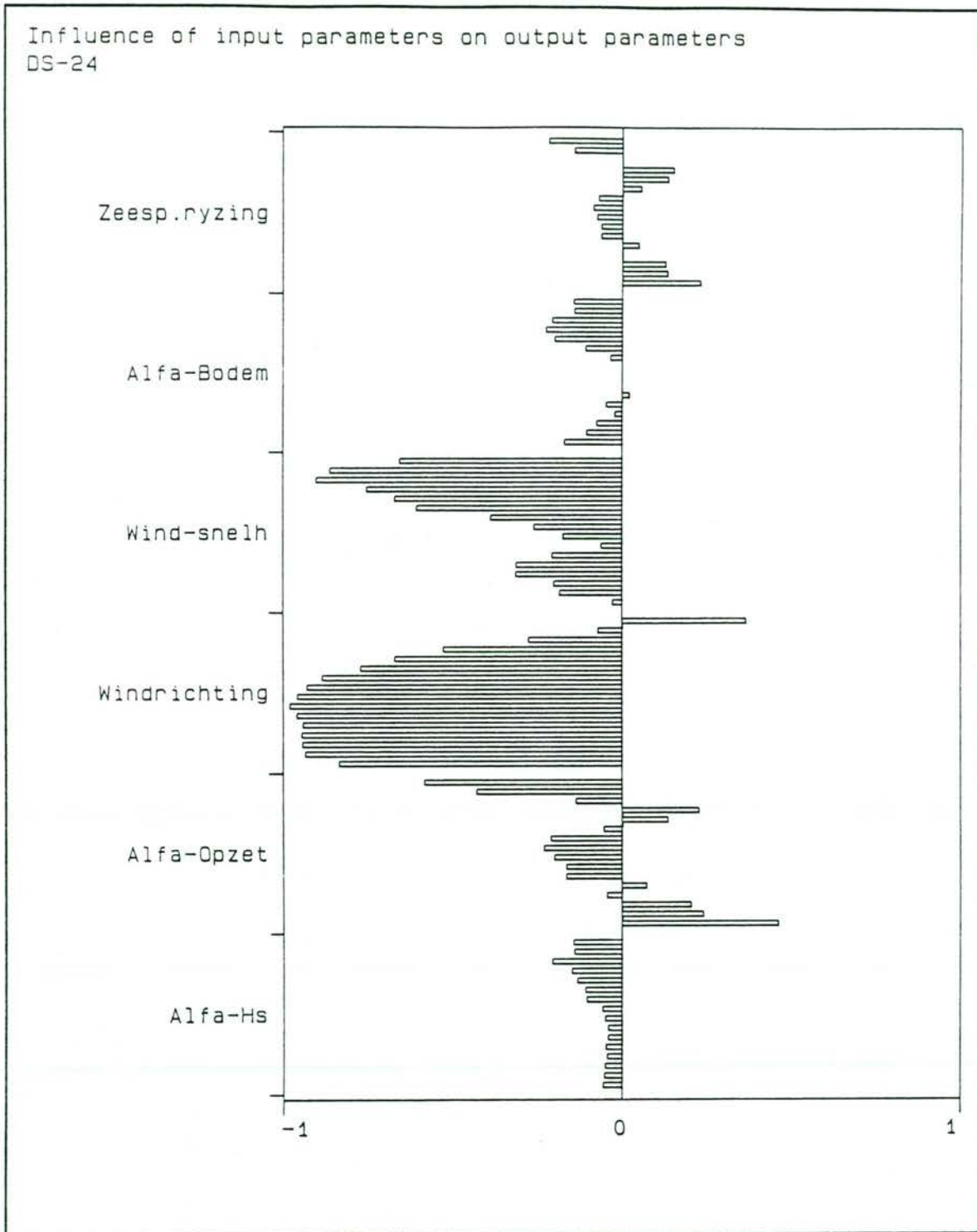


Fig. 6.18 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

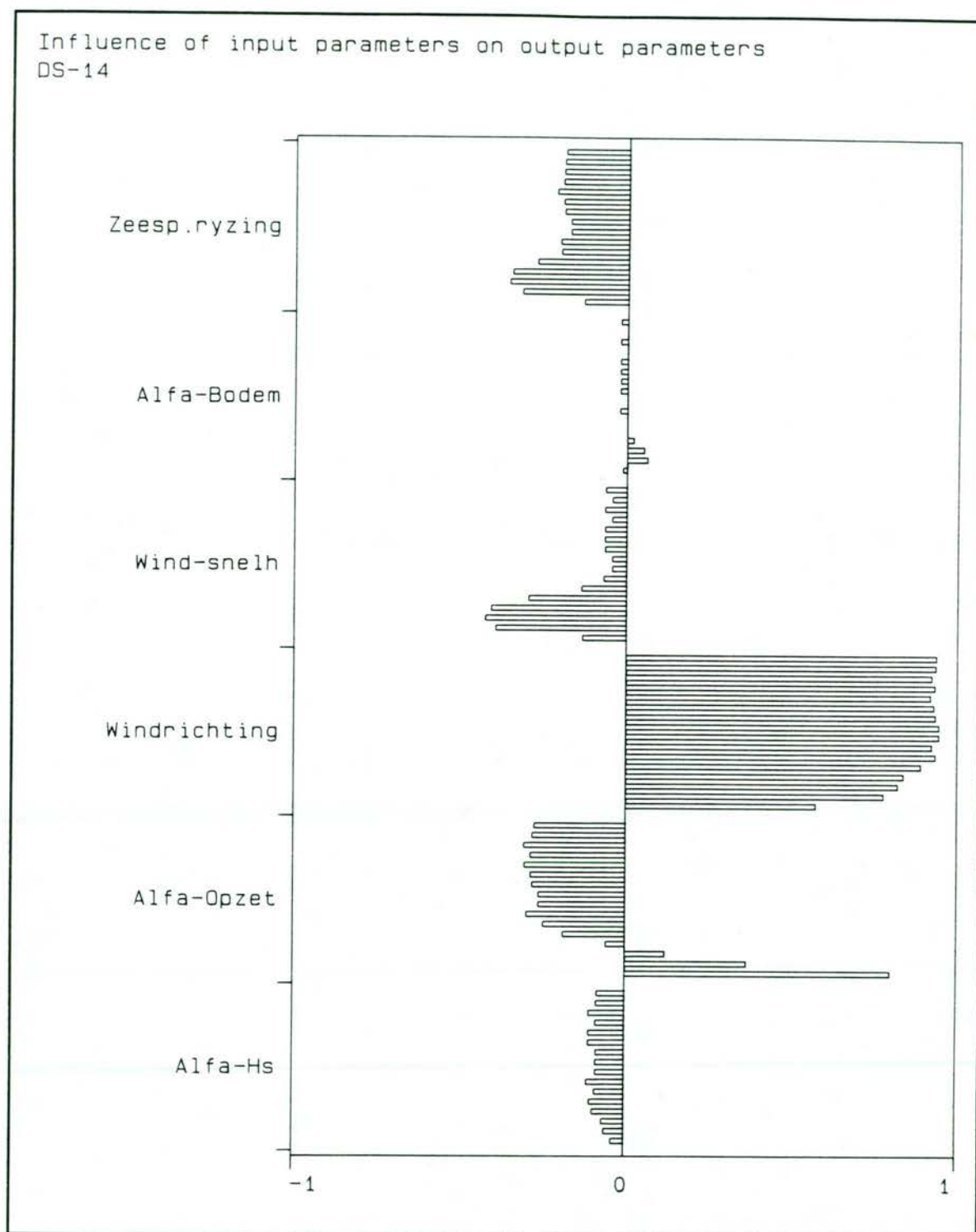


Fig. 6.19 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de midden-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

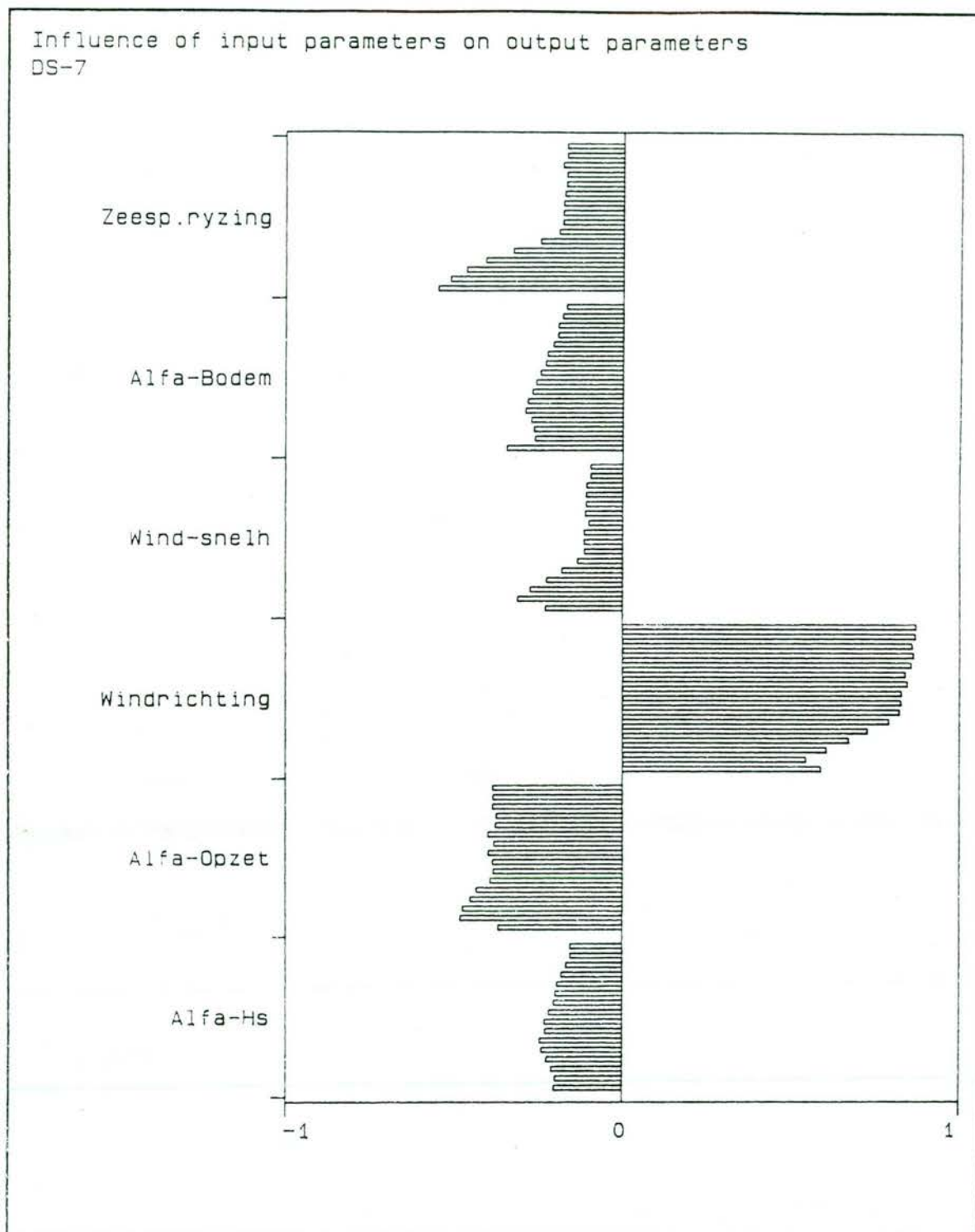


Fig. 6.20 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 6.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

6.5 Conclusies

De conclusies die uit het bovenstaande ten aanzien van de lokaties aan de teen van de Afsluitdijk getrokken kunnen worden zijn:

- a. De significante golfhoogte is nauwelijks tot enigszins (aan de westkant van de Afsluitdijk) gevoelig is voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Zijn onzekerheid (ongeveer 0.20 m) wordt vooral bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s , diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van windopzet (incl. getij). Deze onzekerheidsverdeling is redelijk konstant in het gehele voorland van de dijk.
- b. De gemiddelde golfperiode is nauwelijks gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Overigens geldt voor de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode (0.25 s) hetzelfde als voor de significante golfhoogte.
- c. De gemiddelde golfrichting is gevoelig voor de windrichting en zijn onzekerheid (ongeveer 7°) wordt ook domineert door de onzekerheid in de windrichting.
- d. De golfrichtingsspreiding is vrijwel ongevoelig voor de windrichting maar zijn onzekerheid (minder dan 1°) wordt desondanks voornamelijk bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).
- e. De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing is van matig tot redelijk belang voor de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode (afhankelijk van de lokatie). Voor de onzekerheid van de gemiddelde golfrichting is hij van geen belang maar voor die van de golfrichtingsspreiding wel (maar de waarde van die onzekerheid is zeer klein).

7 Resultaten Westerschelde

De situatie in de Westerschelde voor de golven die de dijk bij Terneuzen naderen is behandeld als een 2-dimensionale situatie. Het ruimtelijk oplossendvermogen voor de bodemtopografie is 400 m x 400 m en voor de berekeningen 278 m x 533 m. De situatie in het gebied voor Terneuzen is vervolgens met een vrij groot oplossend vermogen berekend met een 2-dimensionale geneste HISWA berekening in de grootschalige 2-dimensionale HISWA berekening. Het ruimtelijk oplossendvermogen voor de bodemtopografie is in deze geneste situatie 400 m x 400 m en voor de berekeningen 100 m x 250 m. Daarbinnen zijn voor de dijk bij Terneuzen vervolgens met een nog groter oplossend vermogen twee 2-dimensionale HISWA berekeningen uitgevoerd (één ten westen en één ten oosten van Terneuzen). Het ruimtelijk oplossendvermogen voor de bodemtopografie is in deze geneste situaties 50 m (evenwijdige dieptelijnen) en voor de berekeningen 50 m x 100 m. Het oplossendvermogen in de spectrale richtingen is 10°. De bodemtopografie is gegeven in Fig. 7.1. Er zijn drie raaien onderzocht (zie ook Fig. 7.1):

(a) hoofd-raai (in de lengte-as van de Westerschelde),

(b) west-raai (ten westen van Terneuzen) en

(c) oost-raai (ten oosten van Terneuzen).

De bodemprofielen zijn gegeven zijn in Fig. 7.2. De omgevingsparameters zijn gegeven in Tabel 2.6.

7.1 Significante golfhoogte

7.1.1 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 7.3 en 7.4) neemt de significante golfhoogte H_s af van 5.5 m buiten de Westerschelde tot 1.55 m an het einde van de raai. De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt 19 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.04
α - bodemrijzing	.16
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.95
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.02
α - windopzet (incl. getij)	-.14
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.22

Tabel 7.1 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s in de Westerschelde voor Terneuzen.

De onzekerheid in de significante golfhoogte in de Westerschelde voor Terneuzen wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheden in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai neemt geleidelijk af van 0.78 m in dieper water (begin van de raai ligt beneden-winds van de modelrand waar de opgelegde onzekerheid $\sigma_y = .86$ m, zie Tabel 2.6) tot .19 m aan het einde van de raai (Fig. 7.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.5. Het gedrag van deze genormeerde bijdragen is bijzonder grillig. Dit houdt wellicht verband met het onregelmatige gedrag van de berekeningen bij kleine veranderingen in de waterstand (Appendix B).

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters aan het einde van de hoofd-raai is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.02
bodemrijzing	.26
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	-.05
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.06

Tabel 7.2 De gevoeligheden van de significante golfhoogte in de Westerschelde voor Terneuzen.

7.1.2 West-raai

In de basissituatie neemt de significante golfhoogte H_s af van 1.88 m in dieper water tot 1.29 m aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 7.4). De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .21 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.02
α - bodemrijzing	.22
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.70
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.39
α - windopzet (incl. getij)	-.51
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.22

Tabel 7.3 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de significante golfhoogte ten westen van Terneuzen (teen van de dijk) wordt blijkbaar in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en de onzekerheid in de schatting van de windopzet (incl. getij). De onzekerheden in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) heeft geen invloed.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai blijft vrijwel constant (ongeveer 0.24 m, Fig. 7.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.6. Het gedrag is veel stabielier dan langs de hoofd-raai.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.01
bodemrijzing	.38
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.05
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	-.21
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.07

Tabel 7.4 De gevoeligheden van de significante golfhoogte ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

7.1.3 Oost-raai

In de basissituatie neemt de significante golfhoogte H_s af van 1.65 m in dieper water tot 1.55 m aan de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (Fig. 7.4). De totale onzekerheid in de significante golfhoogte aldaar bedraagt .38 m (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(H_s Z_i)$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.22
α - bodemrijzing	.05
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.44
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.85
α - windopzet (incl. getij)	.14
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.08

Tabel 7.5 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte H_s ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de significante golfhoogte ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk) wordt in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de wind: windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is matig.

De totale onzekerheid in de significante golfhoogte langs de raai is vrijwel constant (ongeveer 0.24 m, Fig. 7.4).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.7. Het is opvallend dat de invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing belangrijker is dan langs de west-raai.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial H_s / \partial Z_i$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.17
bodemrijzing	.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.06
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	-.02
windopzet (incl. getij)	.10
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.05

Tabel 7.6 De gevoelheden van de significante golfhoogte ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk)

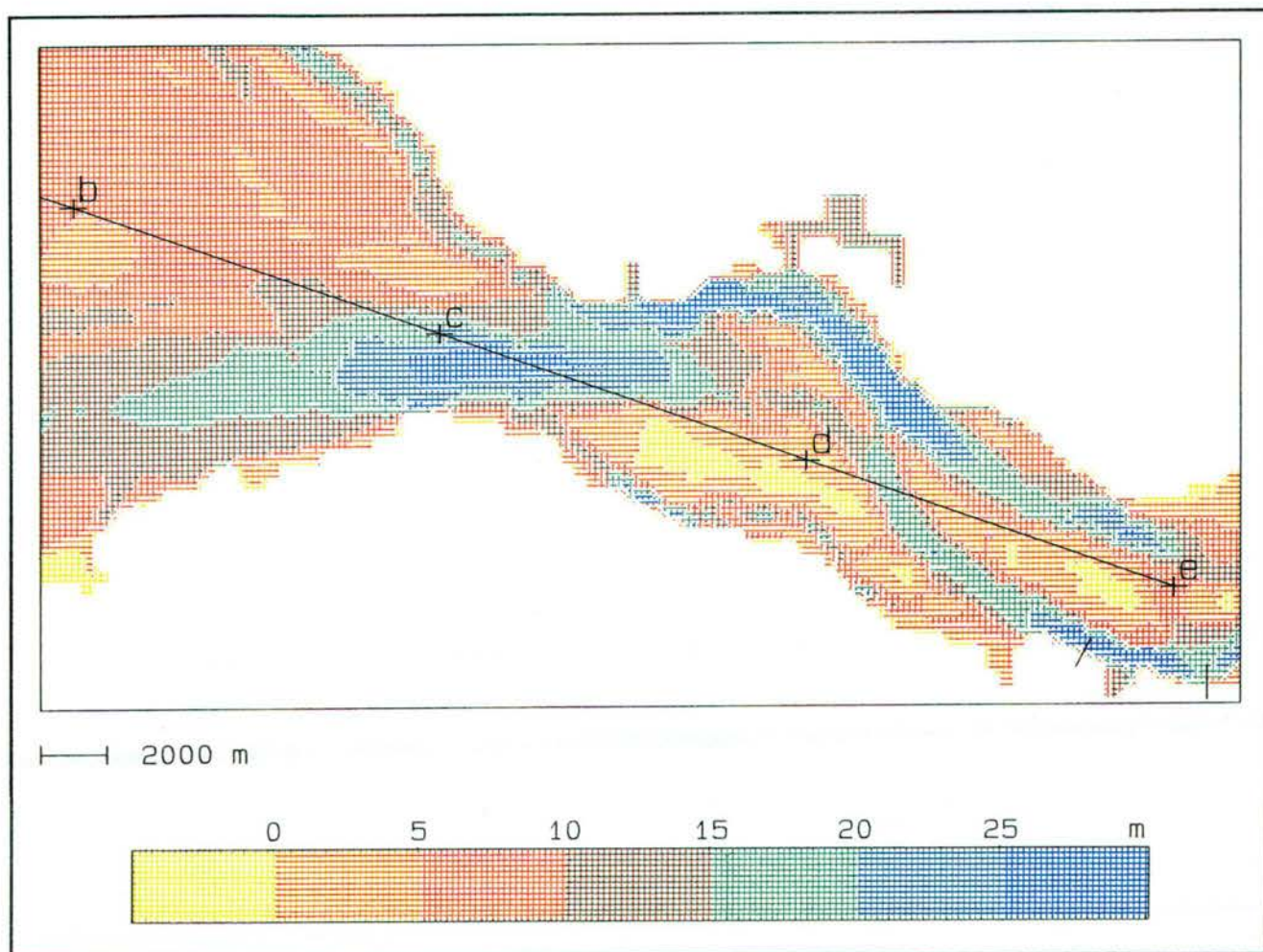


Fig. 7.1 De bodemtopografie van de Westerschelde, bodemligging t.o.v. NAP in m. De letters langs de raai verwijzen naar lokaties die nader onderzocht zijn. Ze liggen op onderling gelijke afstanden, evenals lokatie A die juist buiten de figuur valt.

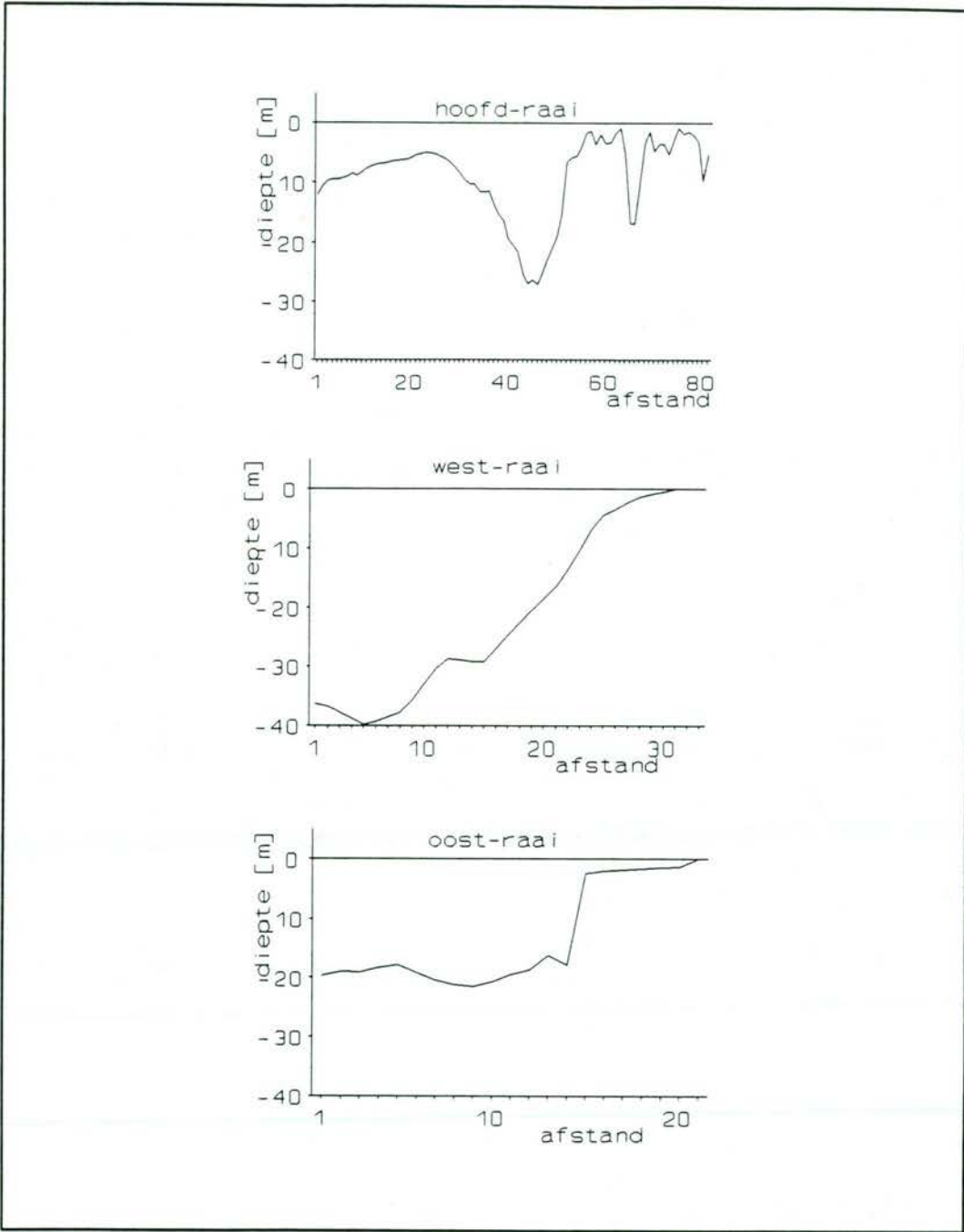


Fig. 7.2 Het verloop van de bodemligging langs de raaien in de Westerschelde (t.o.v. NAP). Horizontaal is uitgezet de afstand (aantal gridpunten) langs de raai, verticaal is uitgezet de diepte in m.

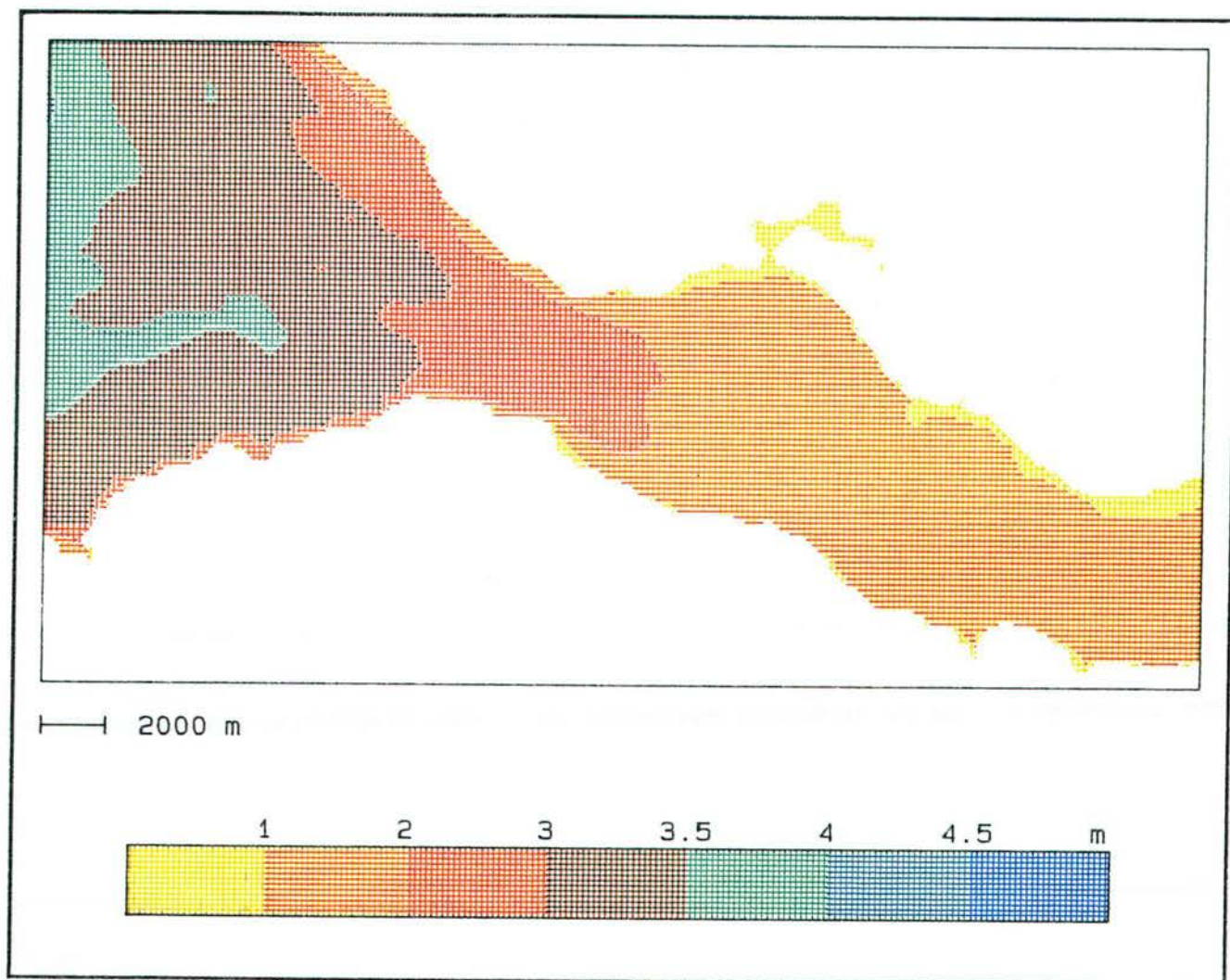


Fig. 7.3 De significante golfhoogte in de basissituatie in de Westerschelde (in m).

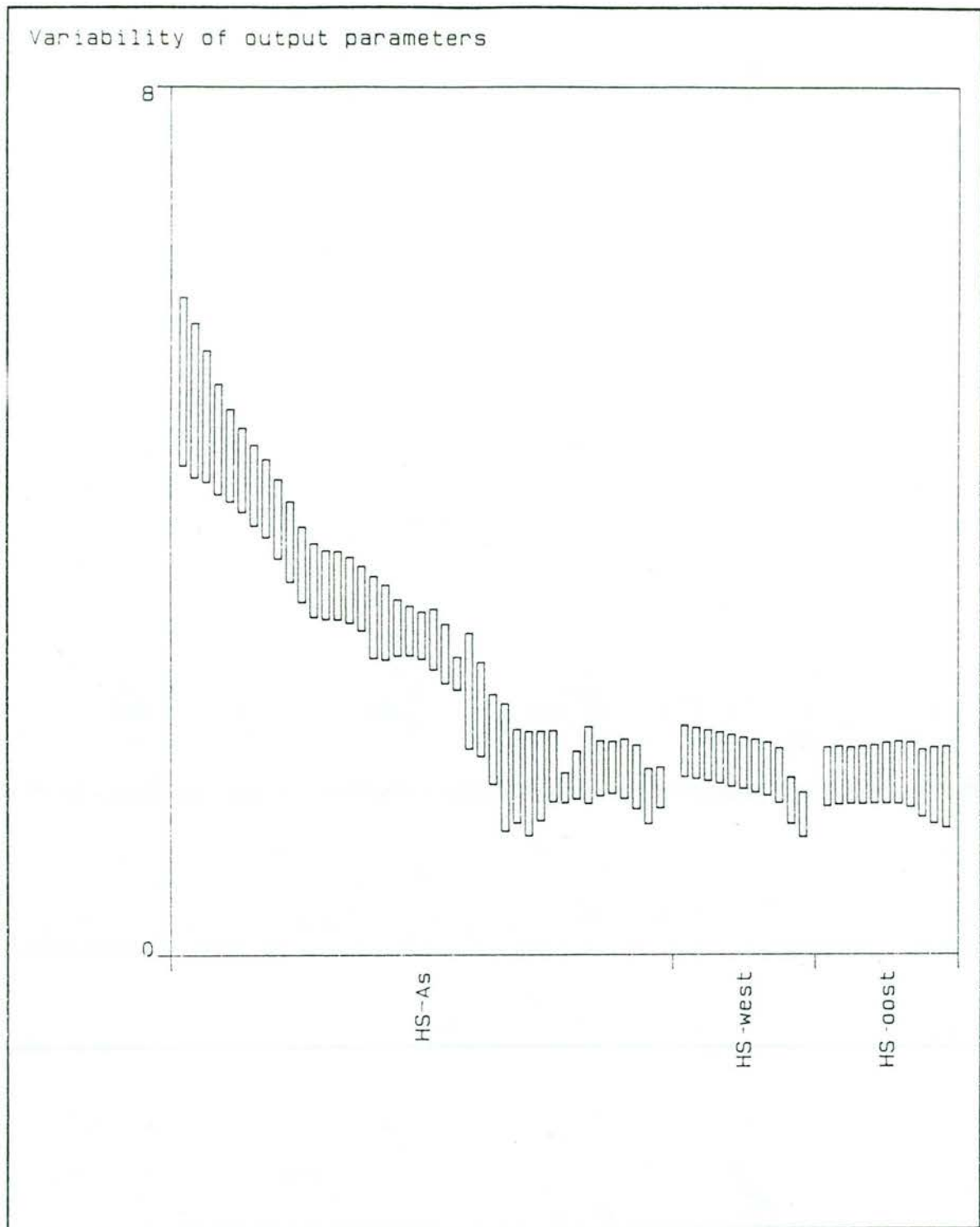


Fig. 7.4 Het verloop van de significante golfhoogte in de basissituatie en de totale onzekerheid in de Westerschelde (as = hoofd-raai, west = west-raai en oost = oost-raai, links is dieper water). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 7.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

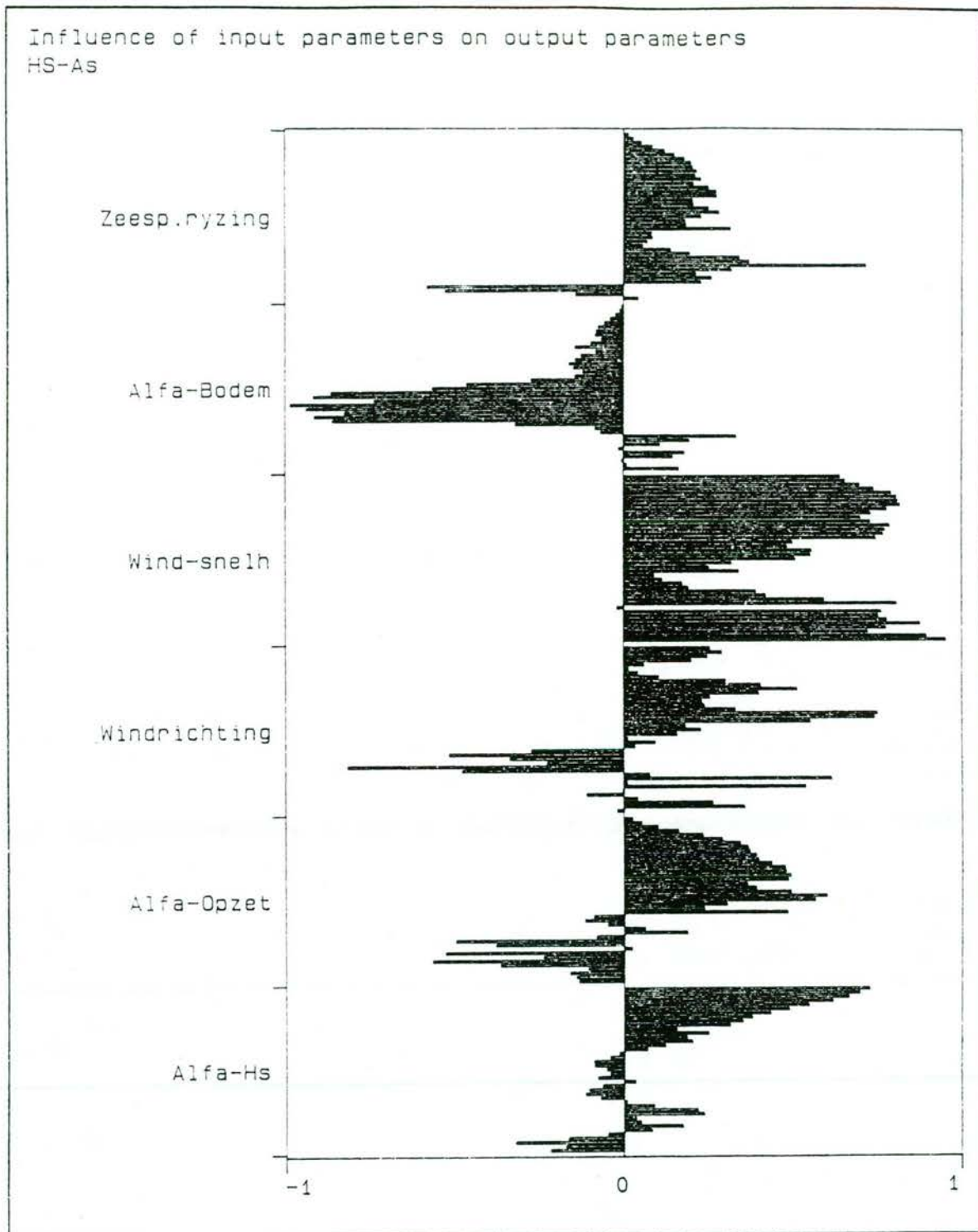


Fig. 7.5 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; ondieper water aan onderzijde van iedere figuur).



Fig. 7.6 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

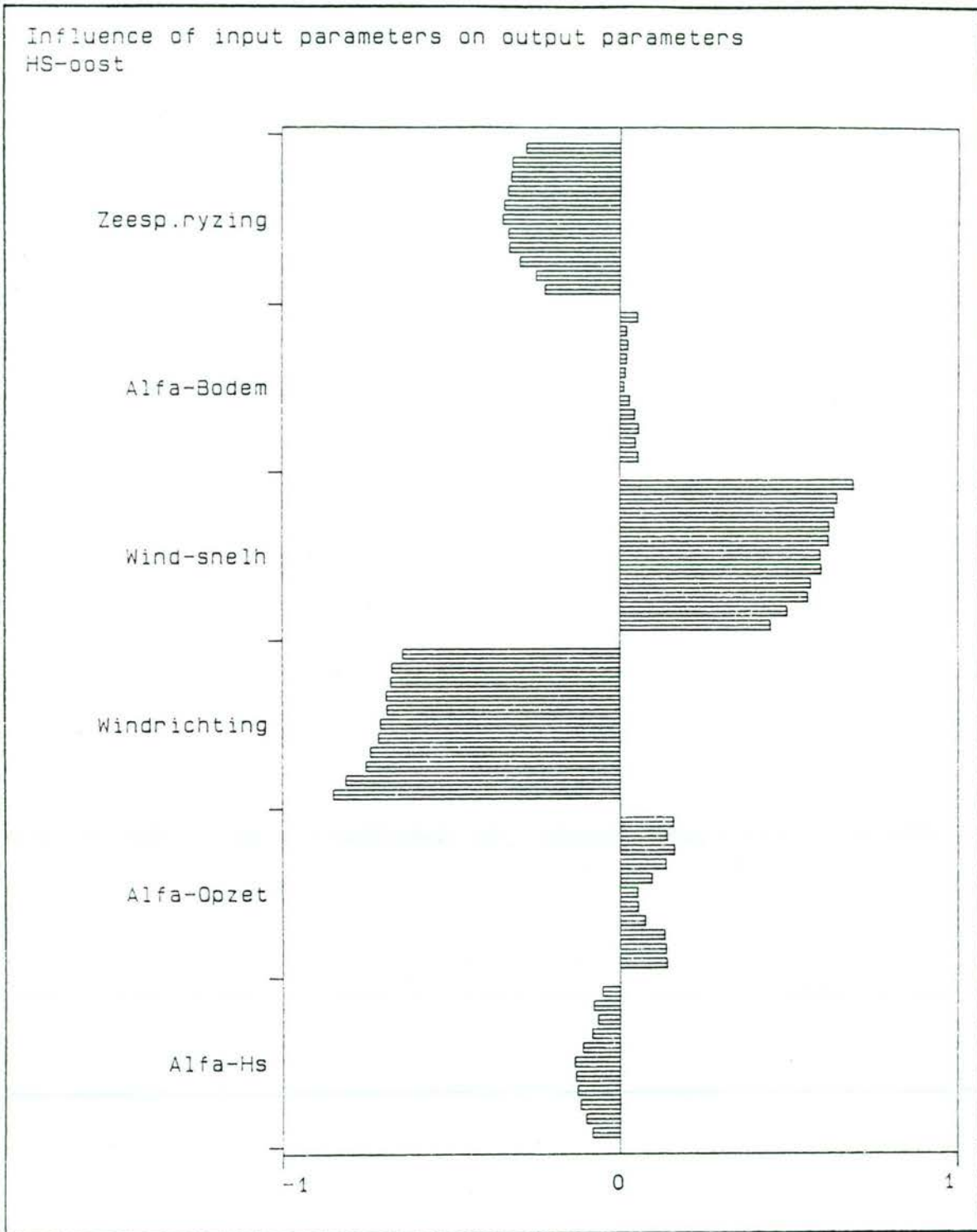


Fig. 7.7 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de significante golfhoogte langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

7.2 Gemiddelde golfperiode

7.2.1 Hoofd-raai

In de basissituatie (Fig. 7.8 en 7.9) neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ af van 8.6 s buiten de Westerschelde tot 4.6 s aan het einde van de hoofd-raai. De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt 0.5 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.18
α - bodemrijzing	-.07
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.51
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.77
α - windopzet (incl. getij)	.32
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.04

Tabel 7.7 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ in de Westerschelde voor Terneuzen.

Uit deze tabel blijkt dat de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode in de Westerschelde voor Terneuzen in belangrijke mate bepaald wordt door onzekerheid in de wind: windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) en windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is matig.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai neemt af van 1.2 s in dieper water tot 0.5 s aan het einde van de raai (Fig. 7.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.10. Opnieuw (evenals bij de onzekerheden van de significante golfhoogte) valt het grillig gedrag op.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters aan het einde van de hoofd-raai is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.16
bodemrijzing	-.28
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.08
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.02
windopzet (incl. getij)	.29
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.03

Tabel 7.8 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode in de Westerschelde voor Terneuzen (teen van de dijk).

7.2.2 West-raai

In de basissituatie neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ af van 5.0 s in dieper water tot 4.9 s aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 7.9). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt 0.3 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.20
α - bodemrijzing	-.27
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.78
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.36
α - windopzet (incl. getij)	-.31
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.21

Tabel 7.9 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfperiode ten westen van Terneuzen (teen van de dijk) wordt, evenals van de significante golfhoogte daar, met name bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) heeft een matige invloed.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai is redelijk konstant (ongeveer 0.25 s, Fig. 7.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.11. De invloed van de onzekerheid in de wind blijft dominant.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.12
bodemrijzing	-.67
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.08
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	-1.82
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.10

Tabel 7.10 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

7.2.3 Oost-raai

In de basissituatie neemt de gemiddelde golfperiode $\bar{T}$ licht toe van 4.5 s in dieper water tot 4.6 s aan de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (Fig. 7.9). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode aldaar bedraagt 0.2 s (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{T} Z_i)$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.13
α - bodemrijzing	-.26
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.86
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.08
α - windopzet (incl. getij)	.09
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.39

Tabel 7.11 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode H_s ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfperiode ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk) wordt blijkbaar met name bepaald door de onzekerheid in de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater). De onzekerheden in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) heeft een zeer matige invloed.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfperiode langs de raai is vrijwel konstant (ongeveer 0.27 s, Fig. 7.9).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.12.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{T} / \partial Z_i$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.06
bodemrijzing	-.51
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.07
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.00
windopzet (incl. getij)	.04
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.14

Tabel 7.12 De gevoeligheden van de gemiddelde golfperiode ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

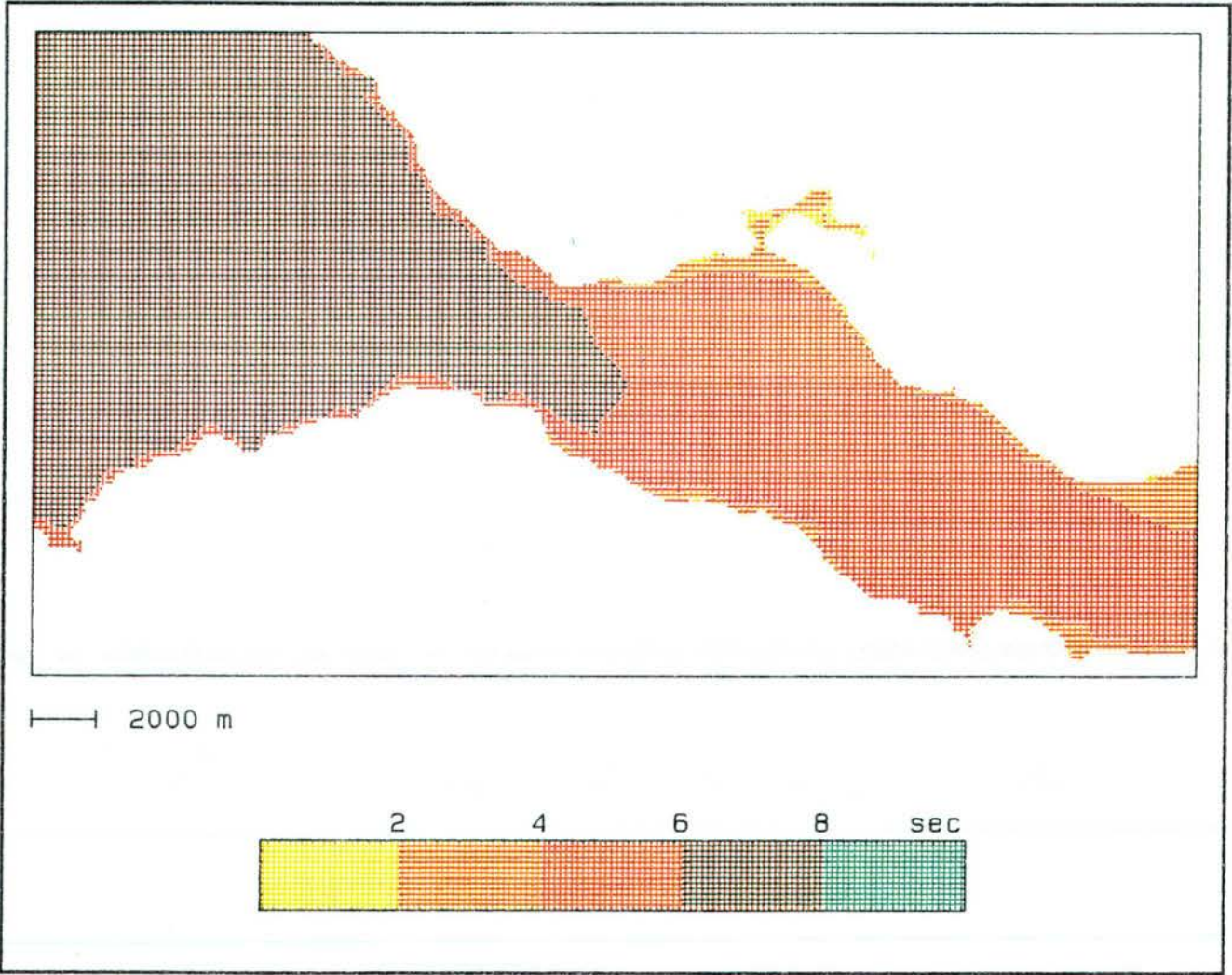


Fig. 7.8 De gemiddelde golfperiode in de basissituatie in de Westerschelde (in s).

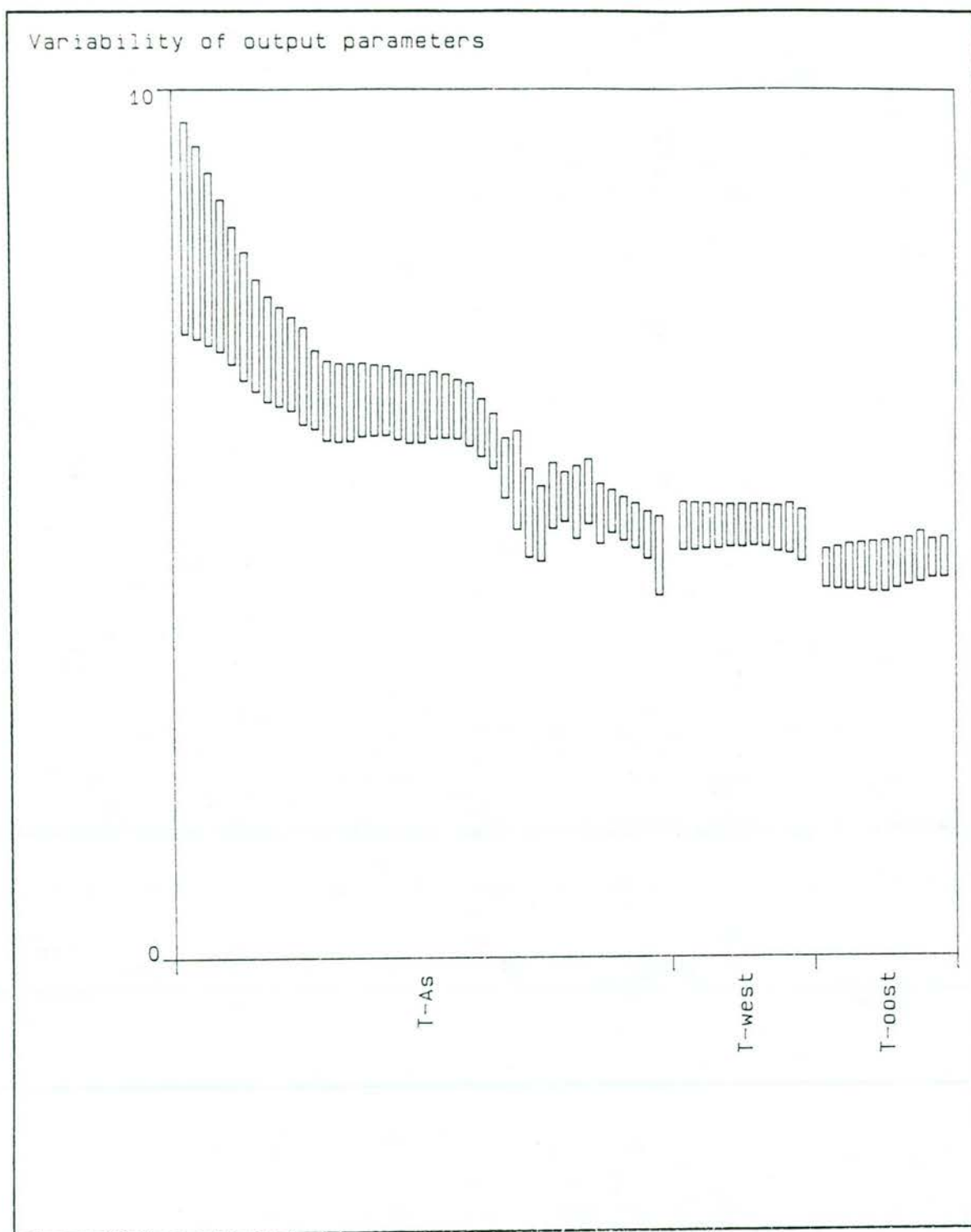


Fig. 7.9 Het verloop van de gemiddelde golfperiode in de basissituatie en de totale onzekerheid in de Westerschelde (as = hoofd-raai, west = west-raai en oost = oost-raai, links is dieper water). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 7.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

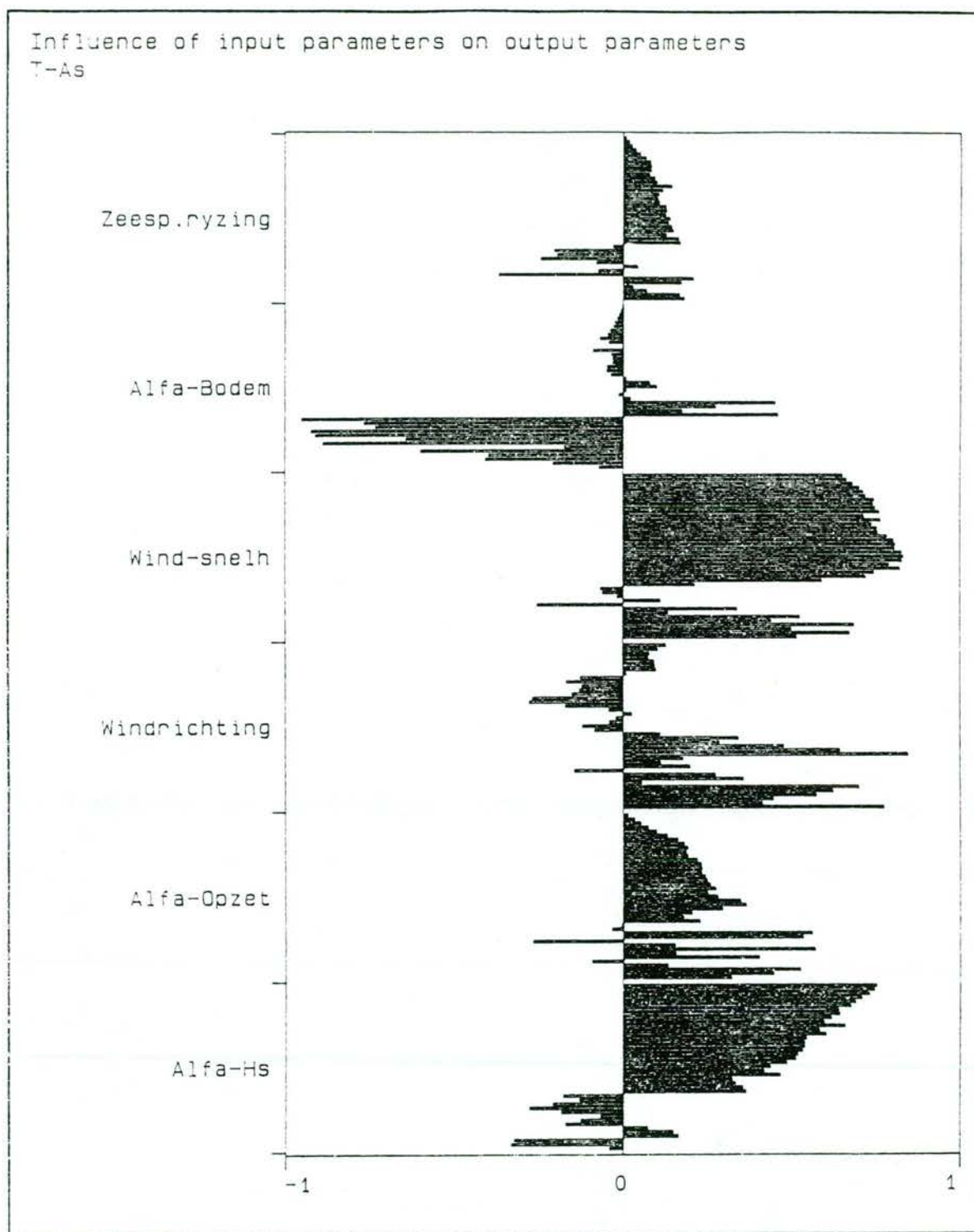


Fig. 7.10 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; ondieper water aan onderzijde van iedere figuur).

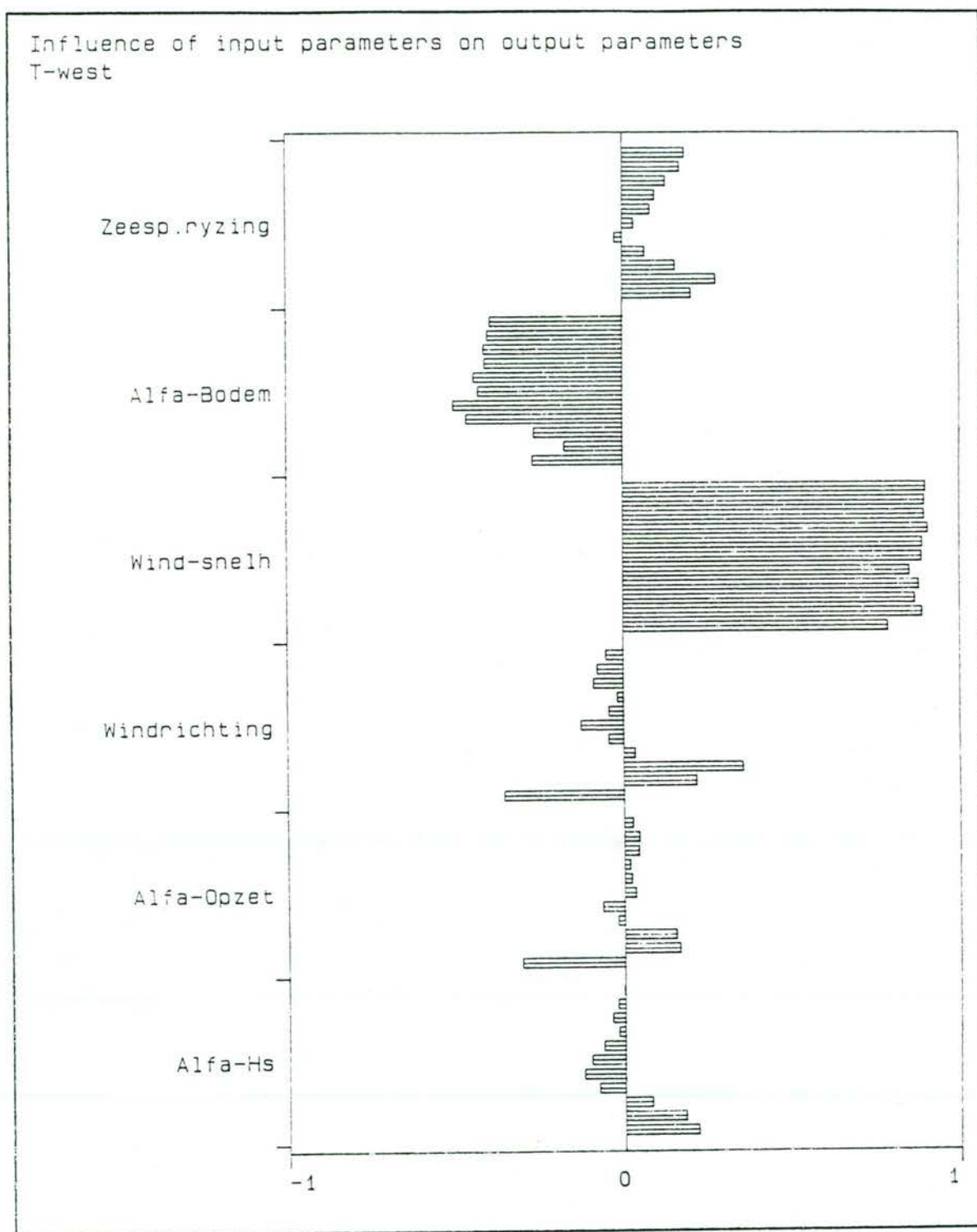


Fig. 7.11 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

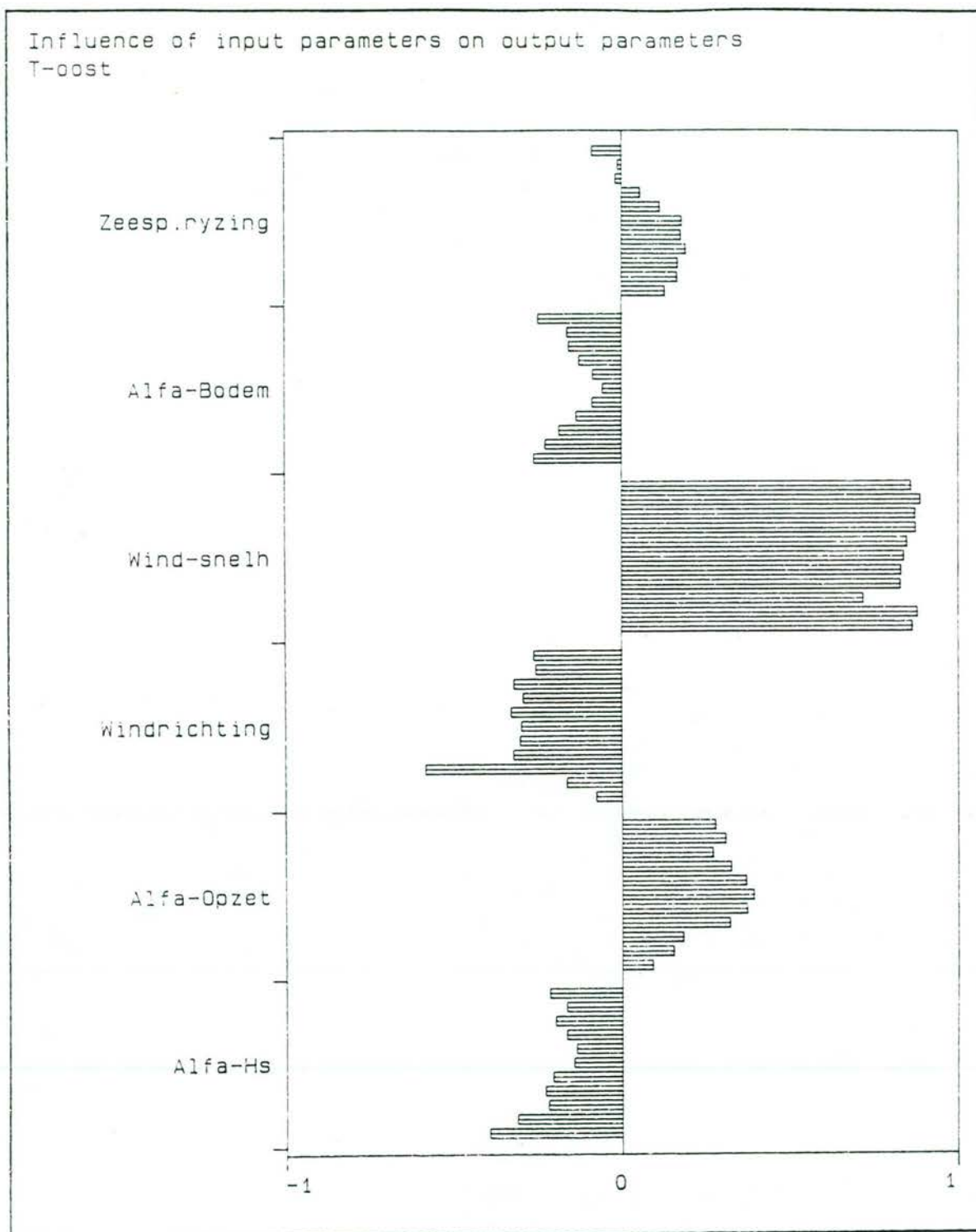


Fig. 7.12 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfperiode langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

7.3 Gemiddelde golfrichting

7.3.1 Hoofd-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ van 315° buiten de Westerschelde naar 305° aan het einde van de hoofd-raai (Fig. 7.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar is vrij groot: 16° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.02
α - bodemrijzing	-.03
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.25
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.94
α - windopzet (incl. getij)	.04
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.19

Tabel 7.13 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ in de Westerschelde voor Terneuzen.

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting in de Westerschelde voor Terneuzen wordt blijkbaar gedomineerd wordt door de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de overige parameters (dus ook de zeespiegelrijzing) is nihil.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting fluctueert zeer aanzienlijk van 2° tot 27° .

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.14. Opnieuw valt de grote grilligheid op.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters aan het einde van de hoofd-raai is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.40
bodemrijzing	-.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.30
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.79
windopzet (incl. getij)	7.03
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-4.62

Tabel 7.14 De gevoelheden van de gemiddelde golfrichting in de Westerschelde voor Terneuzen (teen van de dijk).

7.3.2 West-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ van 320° in dieper water naar 346° aan de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (Fig. 7.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar is relatief groot: 12° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.04
α - bodemrijzing	.02
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.11
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.98
α - windopzet (incl. getij)	.04
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.13

Tabel 7.15 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting ten westen van Terneuzen (teen van de dijk) wordt blijkbaar volledig gedomineerd door de windrichting(incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de overige omgevingsparameters (o.a. de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is klein tot verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai fluctueert rond 10^0 (Fig. 7.13).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.15. Het gedrag is veel stabielier dan langs de hoofd-raai. De dominantie van de windrichting is evident.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.94
bodemrijzing	.24
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	.44
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.80
windopzet (incl. getij)	.98
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	2.47

Tabel 7.16 De gevoeligheden van de gemiddelde golfrichting ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

7.3.3 Oost-raai

In de basissituatie draait de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ van 318° in dieper water naar 332° aan de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (Fig. 7.13). De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting aldaar is, evenals bij de west-raai relatief groot: 6° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\bar{\theta} Z_i)$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.24
α - bodemrijzing	.16
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.08
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.90
α - windopzet (incl. getij)	.31
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.01

Tabel 7.17 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting $\bar{\theta}$ ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de gemiddelde golfrichting ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk) wordt, evenals elders langs de west-raai, voornamelijk bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) is matig.

De totale onzekerheid in de gemiddelde golfrichting langs de raai fluctueert rond de 10^0 (Fig. 7.13).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.16. Ook hier (evenals bij de west-raai) blijft de invloed van de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) domineren.

De gevoelheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \bar{\theta} / \partial Z_i$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	2.96
bodemrijzing	8.25
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-1.67
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.37
windopzet (incl. getij)	3.84
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.14

Tabel 7.18 De gevoelheden van de gemiddelde golfrichting ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

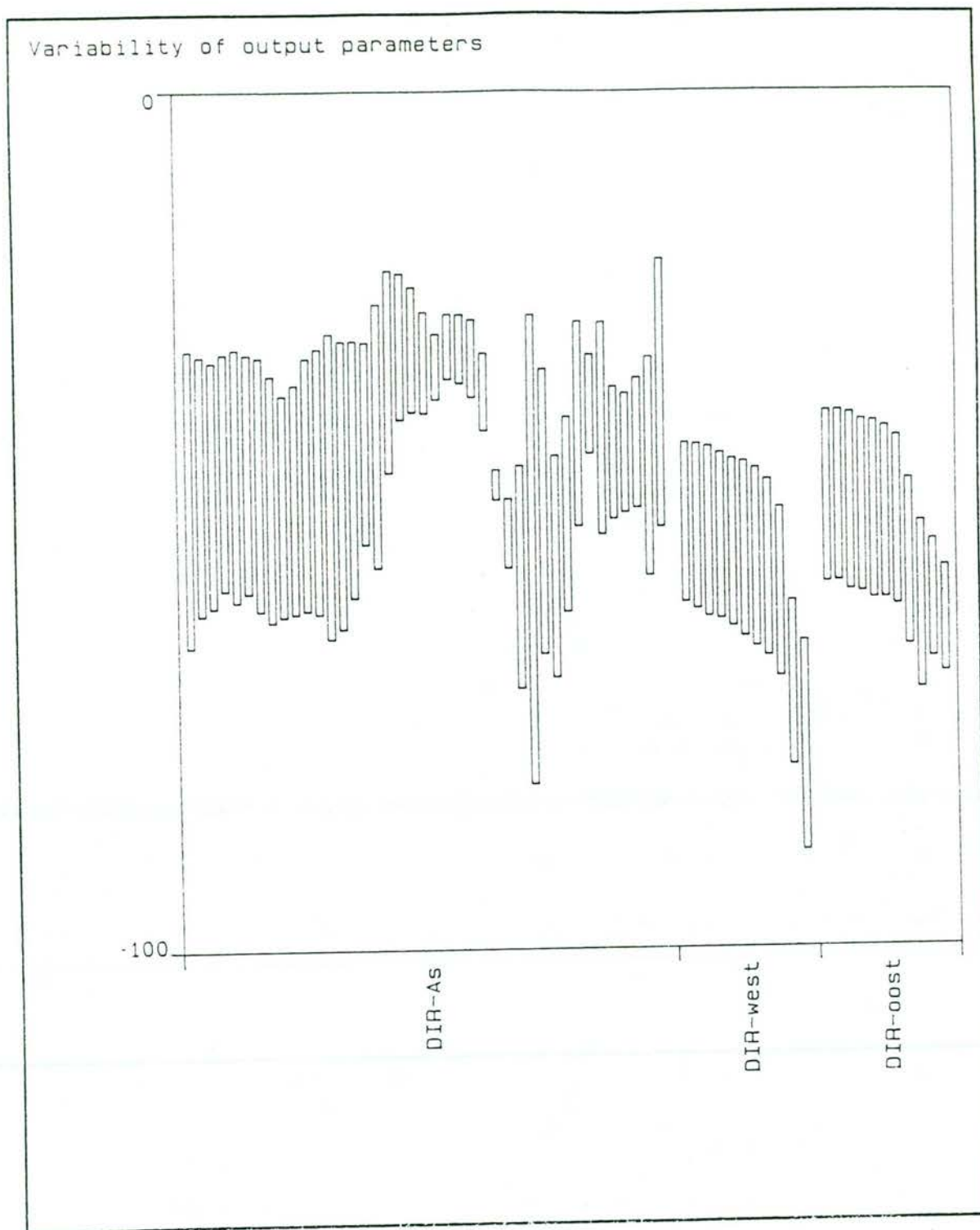


Fig. 7.13 Het verloop van de gemiddelde golfrichting (Cartesische conventie van HISWA) in de basissituatie en de totale onzekerheid in de Westerschelde (as = hoofd-raai, west = west-raai en oost = oost-raai, links is dieper water). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 7.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

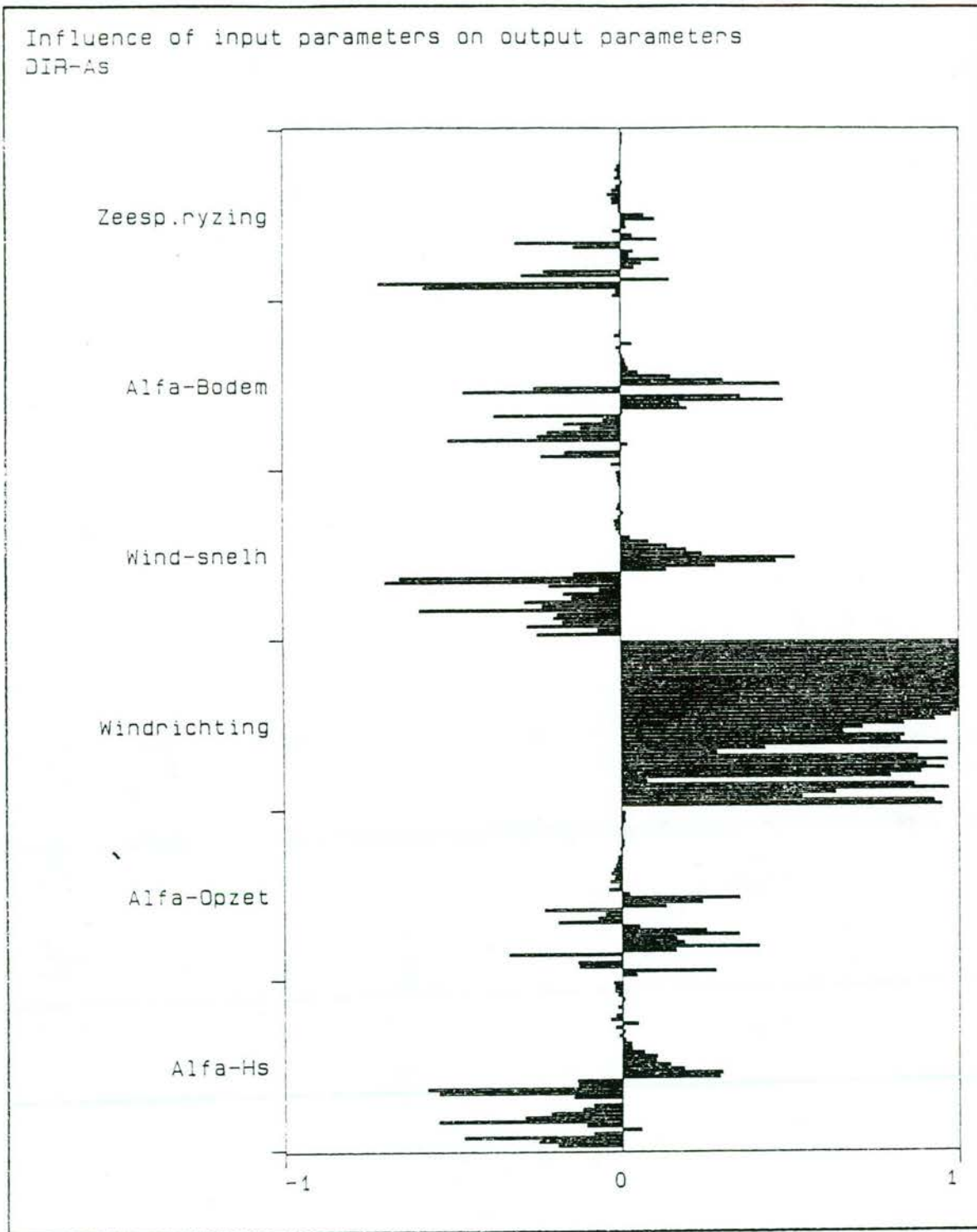


Fig. 7.14 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; ondieper water aan onderzijde van iedere figuur).

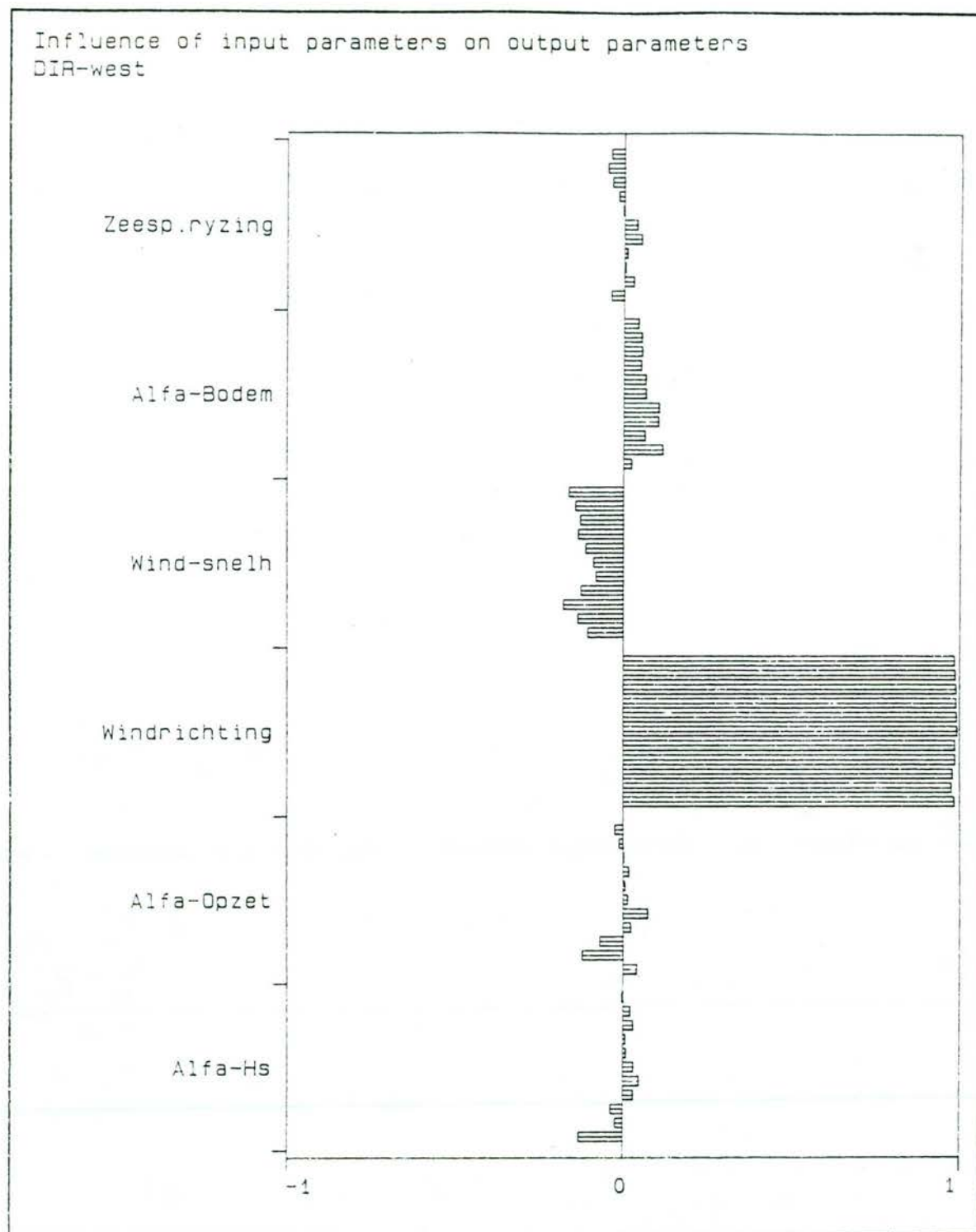


Fig. 7.15 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

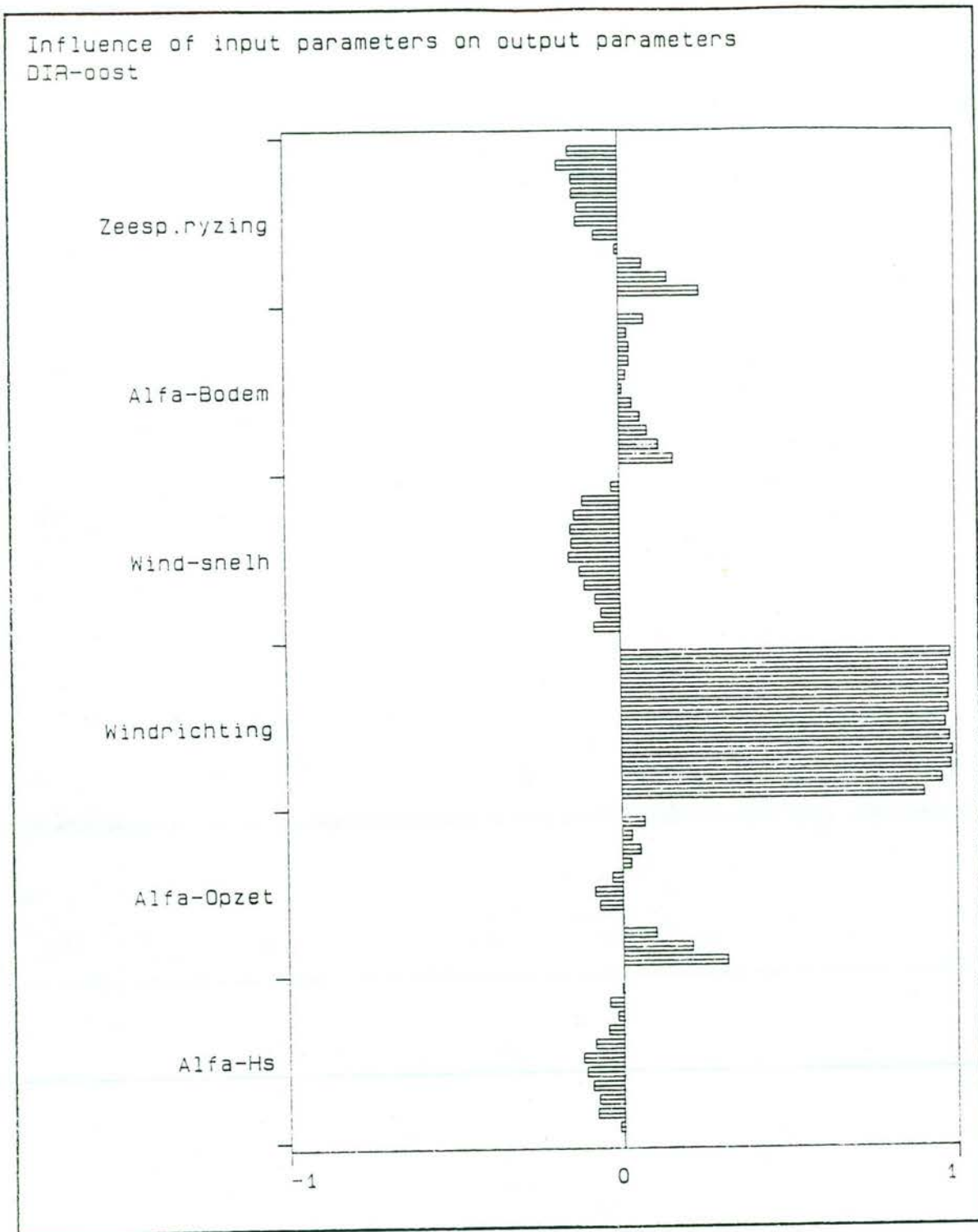


Fig. 7.16 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de gemiddelde golfrichting langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

7.4 Golfrichtingsspreiding

7.4.1 Hoofd-raai

In de basissituatie fluctueert de golfrichtingsspreiding σ_θ in de Westerschelde van 20° tot 30° (einde van de hoofd-raai, Fig. 7.17). De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aan het einde van de hoofd-raai bedraagt 3° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.00
α - bodemrijzing	-.16
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.60
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	-.72
α - windopzet (incl. getij)	-.05
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.30

Tabel 7.19 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ in de Westerschelde voor Terneuzen.

De onzekerheid in de golfrichtingsspreiding in de Westerschelde voor Terneuzen blijkt vooral bepaald te worden door de onzekerheid in de wind: windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water) en in de schatting van de windopzet (incl. getij).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai fluctueert aanzienlijk (van 0.8° tot 7° , Fig. 7.17).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.18. Opnieuw valt het grillige gedrag op .

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters aan het einde van de hoofd-raai is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ hoofd-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.02
bodemrijzing	-4.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.64
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	-.15
windopzet (incl. getij)	-.36
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-1.44

Tabel 7.20 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding in de Westerschelde voor Terneuzen.

7.4.2 West-raai

In de basissituatie (Fig. 7.17) neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ enigszins af van dieper water naar de teen van de dijk ter plaatse van de west-raai (van 24° naar 22°). De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar is relatief groot: 6° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-.18
α - bodemrijzing	.02
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.21
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.91
α - windopzet (incl. getij)	.19
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	-.22

Tabel 7.21 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

De onzekerheid in de golfrichtingsspreiding ten westen van Terneuzen (teen van de dijk) wordt blijkbaar gedomineerd door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water). De invloed van de onzekerheden in de overige omgevingsparameters (o.a. de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)) is matig tot verwaarloosbaar.

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai neemt drastisch toe langs de raai van dieper water naar de teen van de dijk (van 1° naar 6°) (Fig. 7.17).

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.19.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ west-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	-2.42
bodemrijzing	1.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.46
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.40
windopzet (incl. getij)	2.48
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	2.17

Tabel 7.22 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding ten westen van Terneuzen (teen van de dijk).

7.4.3 Oost-raai

In de basissituatie neemt de golfrichtingsspreiding σ_θ enigszins af van dieper water naar de teen van de dijk ter plaatse van de oost-raai (van 29° naar 22°, Fig. 7.17). De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding aldaar bedraagt 5° (d.w.z. ten gevolge van de onzekerheden in alle omgevingsparameters gezamenlijk). De analyse wijst uit dat deze onzekerheid als volgt is opgebouwd (merk op dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1):

omgevingsparameter Z_i	$\sigma^*(\sigma_\theta Z_i)$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	.72
α - bodemrijzing	.17
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.05
windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water)	.55
α - windopzet (incl. getij)	.32
α - H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	.20

Tabel 7.23 De genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding σ_θ ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

De golfrichtingsspreiding ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk) wordt blijkbaar, in tegenstelling tot de situatie bij de west-raai, in belangrijke mate bepaald door de onzekerheid in de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing).

De totale onzekerheid in de golfrichtingsspreiding langs de raai neemt, evenals bij de west-raai, drastisch toe van 1° in dieper water naar 5° bij de teen van de dijk.

De genormeerde bijdragen van de omgevingsparameters in deze onzekerheid langs de raai worden gegeven in het staafdiagram van Fig. 7.20. Er treden grote verschillen op ten opzichte van de situatie bij de west-raai.

De gevoeligheden voor de diverse omgevingsparameters is gegeven in de volgende tabel.

omgevingsparameter Z_i	$\partial \sigma_\theta / \partial Z_i$ oost-raai
zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing)	7.46
bodemrijzing	7.25
windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater)	-.09
windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water)	.19
windopzet (incl. getij)	3.28
H_s (incl. $\bar{T}$, diep water)	1.53

Tabel 7.24 De gevoeligheden van de golfrichtingsspreiding ten oosten van Terneuzen (teen van de dijk).

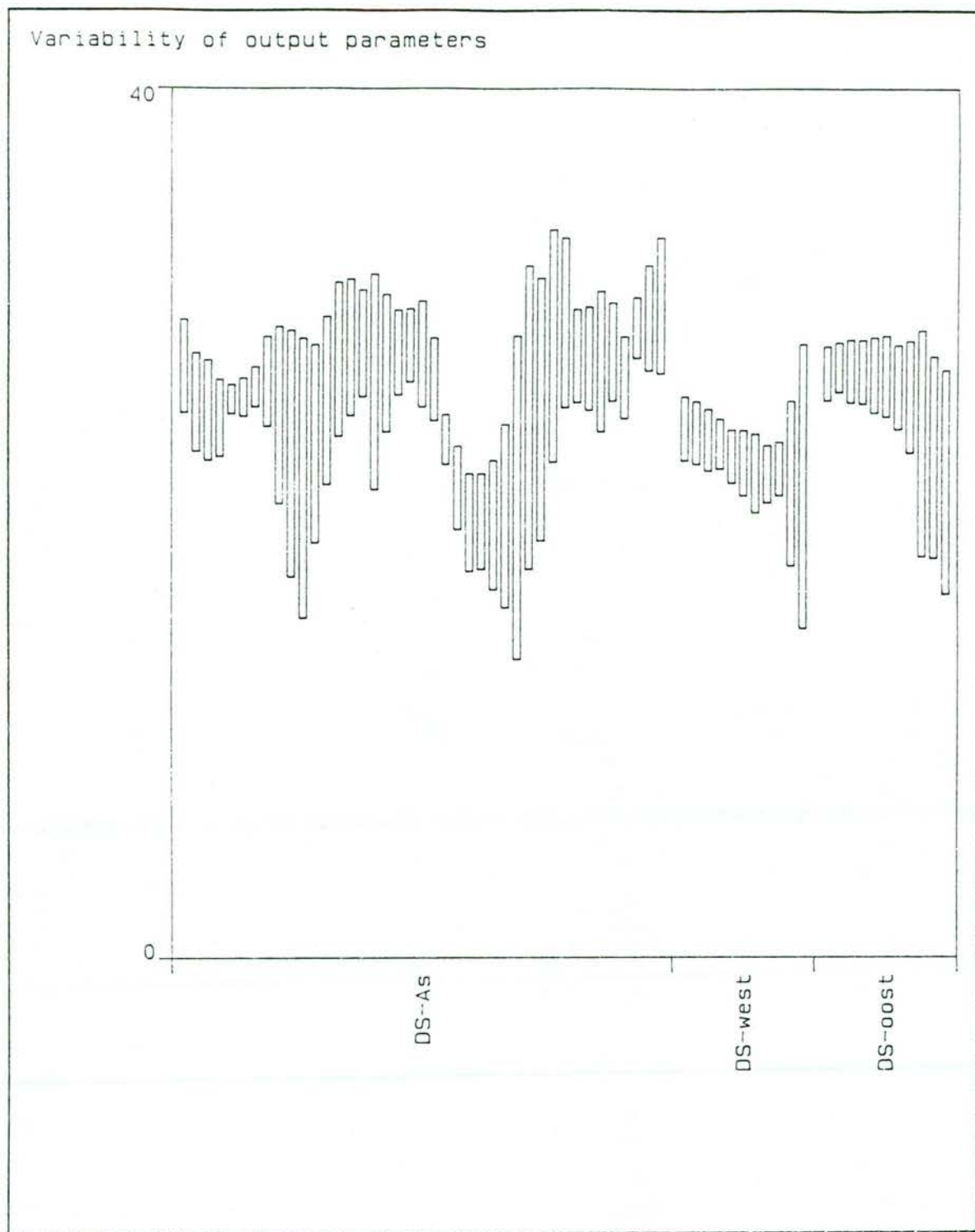


Fig. 7.17 Het verloop van de golfrichtingsspreiding in de basissituatie en de totale onzekerheid in de Westerschelde (as = hoofd-raai, west = west-raai en oost = oost-raai, links is dieper water). Horizontaal is uitgezet de positie van het beschouwde punt langs de betreffende raai (zie Fig. 7.1), verticaal is uitgezet de basiswaarde + en - één standaard-afwijking van de totale onzekerheid (in m).

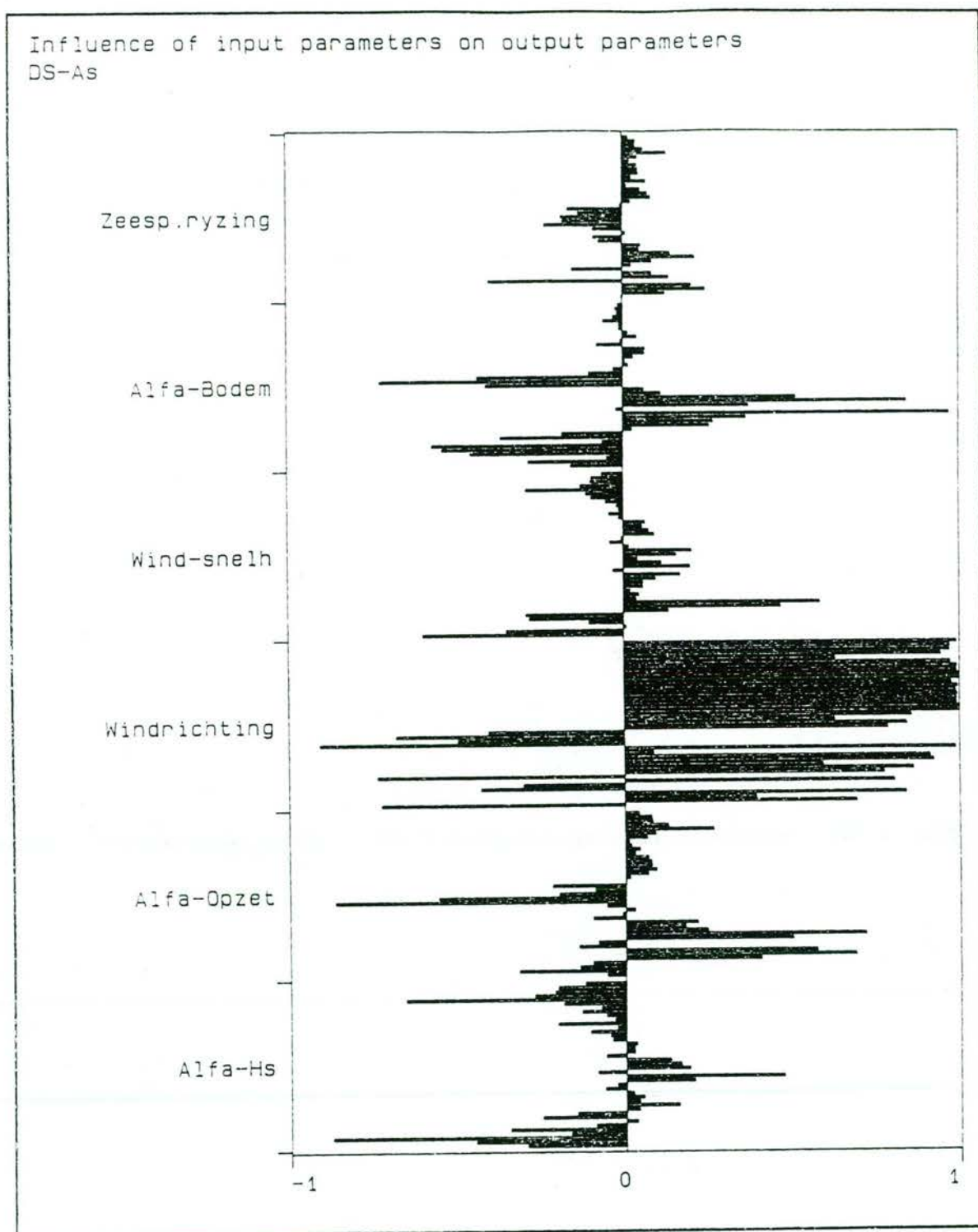


Fig. 7.18 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de hoofd-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; ondiep water aan onderzijde van iedere figuur).

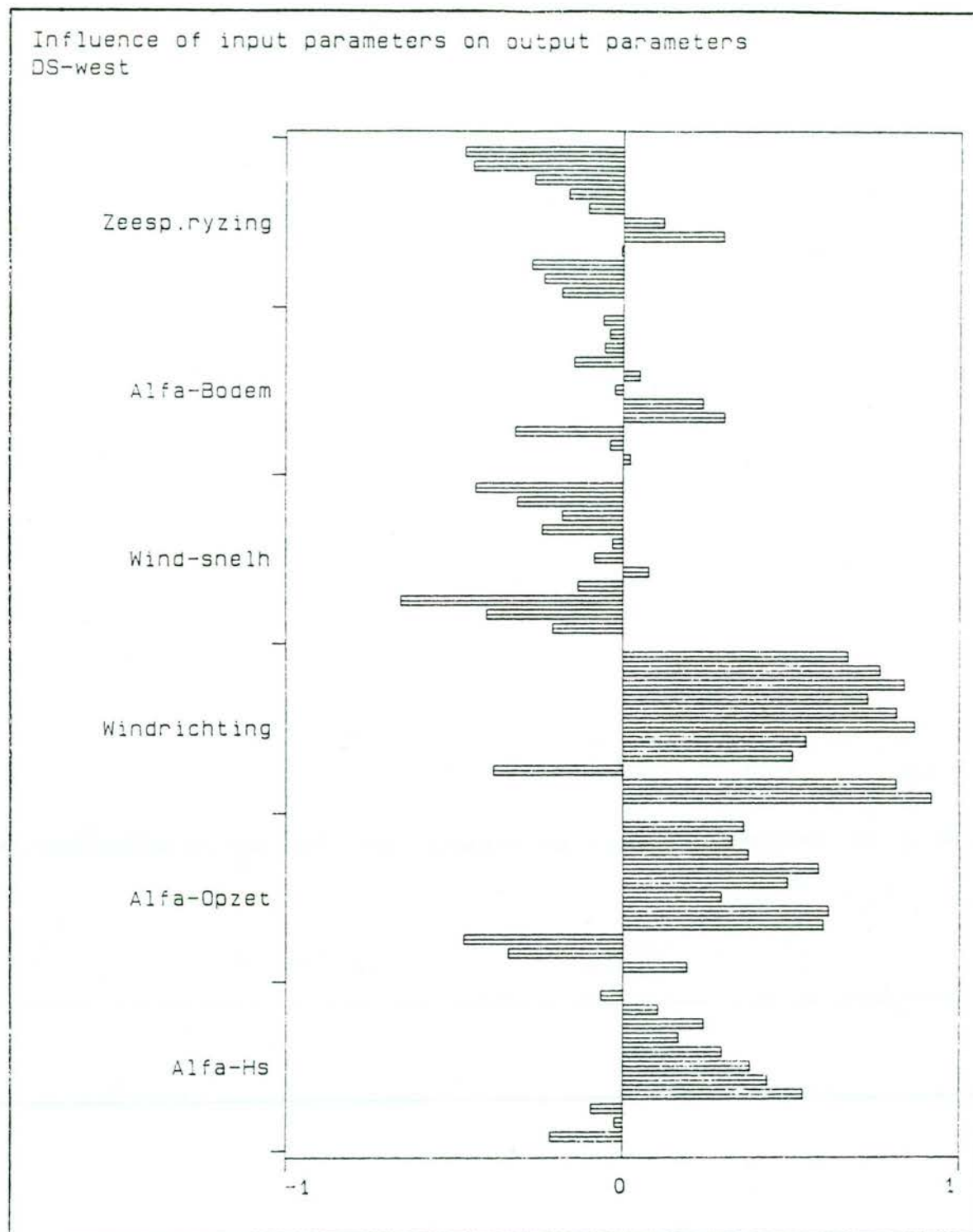


Fig. 7.19 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de west-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

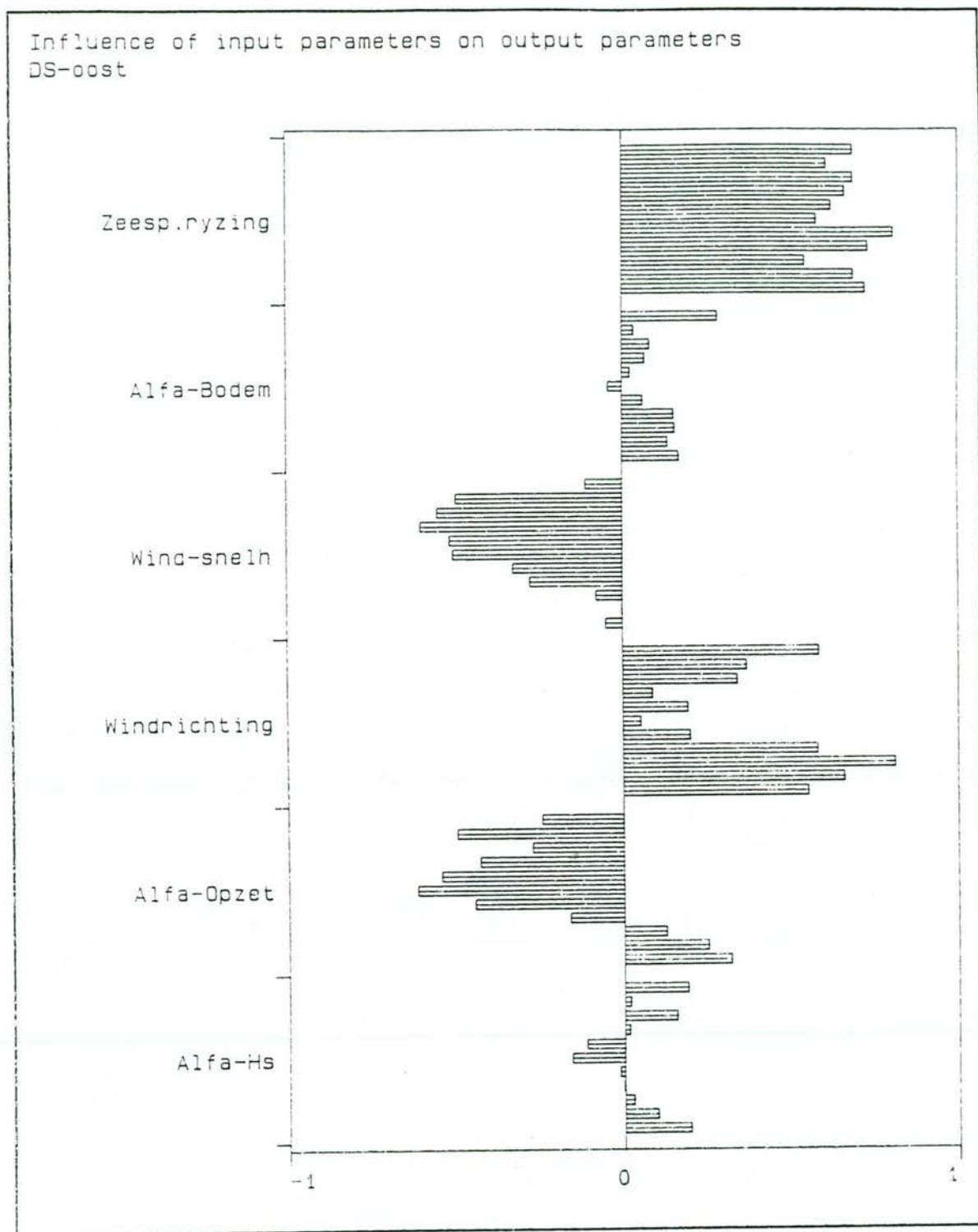


Fig. 7.20 Het verloop van de genormeerde bijdragen van de onzekerheden in de omgevingsparameters aan de totale onzekerheid van de golfrichtingsspreiding langs de oost-raai. Per omgevingsparameter is uitgezet:
 horizontaal : genormeerde bijdrage aan de onzekerheid, verticaal : de positie van het beschouwde punt (zie Fig. 7.1; dijk aan onderzijde van iedere figuur).

7.5 Conclusies

De conclusies die uit het bovenstaande ten aanzien van de lokaties aan de teen van de dijk ten westen en ten oosten van Terneuzen getrokken kunnen worden zijn:

- a. De significante golfhoogte is nauwelijks gevoelig is voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Zijn onzekerheid (0.20 - 0.40 m) wordt vooral bepaald door de onzekerheid in de wind: windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater) en windrichting (= $\bar{\theta}$ diep water) en enigermate door de onzekerheid in de schatting van windopzet (incl. getij). Op dieper water voor Terneuzen domineert de windsnelheid (incl. windopzet + getij + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater).
- b. De gemiddelde golfperiode is nauwelijks gevoelig voor de significante golfhoogte op diep water (incl. $\bar{T}$, diep water). Overigens geldt voor de onzekerheid in de gemiddelde golfperiode (ongeveer 0.25 s) hetzelfde als voor de significante golfhoogte.
- c. De gemiddelde golfrichting is gevoelig voor de windrichting en zijn onzekerheid (die relatief groot is: $6^\circ - 12^\circ$) wordt ook gedomineerd door de onzekerheid in de windrichting.
- d. De golfrichtingsspreiding is matig gevoelig voor de windrichting maar zijn onzekerheid (die relatief groot is: ongeveer 5°) wordt desondanks voornamelijk bepaald door de onzekerheid in de windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water).
- e. De invloed van de onzekerheid in de zeespiegelrijzing is nauwelijks van belang voor het golfbeeld bij de dijk (alleen voor de golfrichtingsspreiding ten oosten va Terneuzen).

8 Discussie en conclusies

De voorliggende studie naar het belang van een zeespiegelrijzing voor het golfbeeld langs de Nederlandse kust en de daarbij optredende onzekerheden is uitgevoerd met een conventionele gevoeligheidsanalyse en een conventionele, meervoudige eerste-orde techniek van foutenvoortplanting (uitgebreid met het relatieve belang van de diverse omgevingsparameters). Daaraan ligt ten grondslag een verondersteld lineair gedrag van het berekende golfbeeld. Aangetoond is dat aan deze voorwaarde niet wordt voldaan in de gegeven omstandigheden. Het golfbeeld dat berekend is met het ondiepwater golfmodel HISWA, blijkt zich niet-lineair en zelfs niet-monotoon te gedragen. Van dit gedrag zijn drie aspecten onderzocht (zie bijlage B):

- a) Het is gebleken dat het onafhankelijk van elkaar variëren van de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode als randvoorwaarden van HISWA onrealistisch is (dit hangt vermoedelijk samen met de modellering van de bodemdissipatie in HISWA).
- b) Het is gebleken dat numerieke ruis geen rol speelt in het niet-lineaire gedrag van het berekende golfbeeld (voor dit deel van het onderzoek is een 64-bits versie van HISWA ontwikkeld ter vervanging van de operationele 32-bits-versie).
- c) Het niet-lineaire gedrag van het berekende golfbeeld treedt in ieder geval op bij een variatie in de waterstand. Het uit zich als een kleinschalige variatie in het golfbeeld gesuperponeerd op een grootschalige variatie (als functie van de waterstand). Een verklaring voor dit verschijnsel is wellicht dat kleine verschuivingen in refractiepatronen relatief grote lokale effecten hebben.

Het niet-lineaire karakter van het berekende golfbeeld heeft ertoe geleid dat het onderzoek is uitgevoerd met relatief grote variaties van de omgevingsparameters (gelijk aan één standaard afwijking van de parameter). Dit kan worden geïnterpreteerd als het gebruik van de gemiddelde gevoeligheid van de parameter over het traject van 1 x zijn standaardafwijking. Door het niet-lineaire karakter zijn de gemiddelde gevoeligheden van diverse parameters niet aan elkaar gelijk waar zij wel aan elkaar gelijk zouden zijn bij een lineair gedrag. Zo zou b.v. de gevoeligheid voor een zeespiegelrijzing gelijk zijn aan die van een windopzet bij een lineair gedrag. Maar dit is niet het geval in de gegeven omstandigheden. Bovendien zijn de resultaten tot op zekere hoogte afhankelijk van de keuze van de zeespiegelrijzing zelf (+ stormvloedstand, beide voorgeschreven door de opdrachtgever). Om deze niet-lineaire effecten enigszins te vermijden kan opgemerkt worden dat de resultaten in essentie twee soorten van omgevingsparameters betreft:

- 1) waterstandsparameters - zeespiegelrijzing en
- bodemrijzing,
- 2) wind-gedomineerde randvoorwaarden - windsnelheid (incl. windopzet + H_s diepwater + $\bar{T}$ diepwater),
- windrichting (incl. $\bar{\theta}$ diep water),
- windopzet en
- de diepwater significante golfhoogte (incl. de diepwater gemiddelde golfperiode).

Door de resultaten van deze twee groepen per kustvak te middelen ontstaat een globaler beeld. Per kustvak is daartoe het gemiddelde bepaald van de gevoeligheid en van de totale onzekerheid van iedere golfparameter en ook van de genormeerde bijdragen daaraan van de waterstandsparameters en de wind-gedomineerde randvoorwaarden. De gemiddelden zijn genomen over de resultaten van de omgevingsparameters in iedere groep (waterstandsparameters en wind-gedomineerde randvoorwaarden) en over de gekozen lokaties aan de teen van de dijk / waterlijn op NAP (Tabel 8.1)¹.

¹ Rekenkundige gemiddelden zijn genomen van de gevoeligheden en van de onzekerheden; kwadratische gemiddelden (rms) zijn genomen van de bijdragen. Daarbij zijn de absolute waarden van de gevoeligheden gebruikt.

		gevoeligheid voor de waterstands- parameters ²	totale onzekerheid	genormeerde bijdrage van de waterstands- parameters aan de onzekerheid	genormeerde bijdrage van de wind-gedomineerde randvoorwaarden aan de onzekerheid
H_s	Hondsbosse Zeewering	0.48 m/m	0.45 m	.28	.96
	Haringvliet	0.45 m/m	0.30 m	.41	.91
	Afsluitdijk	0.14 m/m	0.22 m	.23	.97
	Westerschelde	0.18 m/m	0.29 m	.23	.97
$\bar{T}$	Hondsbosse Zeewering	0.10 s/m	0.7 s	.11	.99
	Haringvliet	0.29 s/m	0.4 s	.21	.97
	Afsluitdijk	0.20 s/m	0.3 s	.34	.93
	Westerschelde	0.34 s/m	0.2 s	.32	.95
$\bar{\theta}$	Hondsbosse Zeewering	2.63 °/m	7°	.08	.99
	Haringvliet	1.67 °/m	3°	.20	.97
	Afsluitdijk	1.12 °/m	7°	.06	.99
	Westerschelde	3.10 °/m	9°	.21	.98
σ_θ	Hondsbosse Zeewering	0.80 °/m	0.6°	.34	.93
	Haringvliet	1.02 °/m	0.2°	.19	.98
	Afsluitdijk	0.67 °/m	0.6°	.41	.91
	Westerschelde	4.57 °/m	5.5°	.54	.84

Tabel 8.1 Gemiddelde gevoeligheden, onzekerheden en genormeerde bijdragen daaraan per aangegeven kustvak aan de teen van de dijk / waterlijn (NAP) bij 5 m stormvloedstand. Merk op dat de som van de kwadraten van de genormeerde bijdragen per kustvak gelijk is aan 1.

² verandering per meter waterstandsverandering

Mede op grond van bovenstaande tabel kunnen de volgende algemene conclusies van deze studie worden geformuleerd:

De volgende conclusies hebben strikt genomen alleen betrekking op de onderzochte lokaties (d.w.z. aan de teen van de dijk / waterlijn op NAP: Hondsbosse Zeewering, Haringvlietssluisen, Waddenzee (Afsluitdijk), Westerschelde (Terneuzen) bij 5 m stormvloedstand.

- 1 De parameters van het berekende golfveld langs de Nederlandse kust gedragen zich niet lineair als functie van de waterstand. Mede daardoor variëren de onderstaande getallen ongeveer 50% van lokatie tot lokatie (en voor de golfrichtingsspreiding ongeveer een factor 2 à 3)
- 2 Het belang van de zeespiegelrijzing (incl. bodemrijzing) voor het golfbeeld langs de Nederlandse kust is,
 - voor de significante golfhoogte ongeveer 0.3 m per meter zeespiegelrijzing,
 - voor de gemiddelde golfperiode ongeveer 0.25 s per meter zeespiegelrijzing,
 - voor de gemiddelde golfrichting ongeveer 2° per meter zeespiegelrijzing,
 - voor de golfrichtingsspreiding ongeveer 2° per meter zeespiegelrijzing.
- 3 Ten gevolge van de onzekerheden in de zeespiegelrijzing en de daarmee samenhangende omgevingsparameters, zijn langs de Nederlandse kust de onzekerheden,
 - in de significante golfhoogte ongeveer 0.3 m,
 - in de gemiddelde golfperiode ongeveer 0.4 s,
 - in de gemiddelde golfrichting ongeveer 6° ,
 - in de golfrichtingsspreiding ongeveer 2° .
- 4 De bijdrage van de onzekerheid van de zeespiegelrijzing (incl. bodemstijging) in deze onzekerheden is tamelijk bescheiden. Die van de daarmee samenhangende omgevingsparameters overheerst (de wind-gedomineerde randvoorwaarden: windsnelheid, windrichting, windopzet, significante golfhoogte, gemiddelde golfperiode en gemiddelde golfrichting op diep water).

Aanvullende (detail) conclusies zijn gegeven in de afzonderlijke hoofdstukken van dit rapport.

APPENDIX A

Het ontbinden van twee gecorreleerde stochastische grootheden

Veronderstel dat twee stochastische grootheden x en y van elkaar afhankelijk zijn volgens

$$y = \alpha \cdot x$$

waar α een stochastische variabele is die onafhankelijk is van x , dan zijn x en y i.h.a. gecorreleerd. De eigenschappen van α , evenals de correlatiecoëfficiënt van x en y zijn als volgt af te leiden uit de eigenschappen van x en y .

Gemiddelde van α

Omdat x en α stochastisch onafhankelijk zijn is het gemiddelde van α gegeven door

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$$

Bewijs:

Met $y = \alpha x$ en de definitie van $\bar{y}$,

$$\bar{y} = \int y p(y) dy$$

volgt

$$\bar{y} = \int \int \alpha \cdot x p(x, \alpha) dx d\alpha$$

waar $p(x, \alpha)$ de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie is van x en α . Omdat x en α stochastisch onafhankelijk zijn is $p(x, \alpha) = p(x)p(\alpha)$, zodat

$$\bar{y} = \int x p(x) dx \cdot \int \alpha p(\alpha) d\alpha = \bar{x} \cdot \bar{\alpha}$$

en dus

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$$

Standaardafwijking van α

De standaardafwijking van α is gegeven door

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_y^*}{\bar{x}}$$

waar σ_y^* de voorwaardelijke standaard afwijking is van y (d.w.z. de standaard afwijking voor een gegeven waarde van x die hier verondersteld wordt constant te zijn zodat σ_y^* voor alle waarden van x , dus ook voor $x = \bar{x}$, dezelfde waarde heeft, $\sigma_y^* = \sigma_{y|x=\bar{x}}$)

Bewijs:

per definitie

$$\sigma_y^{*2} = \int (y - \bar{y})^2 p(y|x = \bar{x}) dy$$

en voor $x = \bar{x}$

$$y = \alpha \bar{x}$$

zodat

$$\sigma_y^{*2} = \int (\alpha^2 \bar{x}^2 - 2\alpha \bar{x}^2 + \alpha^2 \bar{x}^2) d\alpha$$

$$\sigma_y^{*2} = \sigma_{\alpha}^2 \bar{x}^2 + \bar{x}^2 \sigma_{\alpha}^2 - 2\alpha \bar{x}^2 + \alpha^2 \bar{x}^2$$

$$\sigma_y^{*2} = \sigma_{\alpha}^2 \bar{x}^2$$

en dus

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_y^*}{\bar{x}}$$

Omdat σ_y^* constant veronderstelt is, geldt deze uitkomst voor alle x .

Marginale standaard afwijking van y

De marginale standaard afwijking van y (σ_y , ofwel de onvoorwaardelijke standaardafwijking) is gegeven door

$$\sigma_y = (\sigma_{\alpha}^2 \sigma_x^2 + \bar{x}^2 \sigma_{\alpha}^2 + \alpha^2 \sigma_x^2)^{1/2}$$

Bewijs:

per definitie

$$\sigma_y^2 = \int (y - \bar{y})^2 p(y) dy$$

met $y = \alpha x$ wordt dit

$$\sigma_y^2 = \iint (\alpha x - \bar{\alpha} \bar{x})^2 p(x, \alpha) dx d\alpha$$

en omdat x en α onafhankelijk zijn,

$$\sigma_y^2 = \iint (\alpha x - \bar{\alpha} \bar{x})^2 p(x) p(\alpha) dx d\alpha$$

$$\sigma_y^2 = \iint (\alpha^2 x^2 - 2\alpha \bar{\alpha} x \bar{x} + \bar{\alpha}^2 \bar{x}^2) p(x) p(\alpha) dx d\alpha$$

en omdat

$$\iint x^2 p(x) dx = \sigma_x^2 + \bar{x}^2$$

(evenzo voor α),

$$\sigma_y^2 = (\sigma_\alpha^2 + \bar{\alpha}^2)(\sigma_x^2 + \bar{x}^2) - 2\bar{\alpha}^2 \bar{x}^2 + \bar{\alpha}^2 \bar{x}^2$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_\alpha^2 \sigma_x^2 + \bar{x}^2 \sigma_\alpha^2 + \bar{\alpha}^2 \sigma_x^2$$

zodat

$$\sigma_y = (\sigma_\alpha^2 \sigma_x^2 + \bar{x}^2 \sigma_\alpha^2 + \bar{\alpha}^2 \sigma_x^2)^{1/2}$$

Covariantie van x en y

De covariantie van x en y ($cov(x,y)$) is dan

$$cov(x,y) = \bar{\alpha} \sigma_x^2$$

bewijs:

per definitie

$$cov(x,y) = \iint (x - \bar{x})(y - \bar{y}) p(x,y) dx dy$$

met $y = \alpha x$ en x en y onafhankelijk van elkaar, wordt dit

$$cov(x,y) = \iint (x - \bar{x})(\alpha x - \bar{\alpha} \bar{x}) p(x) p(\alpha) dx d\alpha$$

$$cov(x,y) = \iint (\alpha x^2 - \alpha x \bar{x} - \bar{\alpha} x \bar{x} + \bar{\alpha} \bar{x}^2) p(x) p(\alpha) dx d\alpha$$

$$cov(x,y) = \bar{\alpha} \sigma_x^2 + \bar{\alpha} \bar{x}^2 - 2\bar{\alpha} \bar{x}^2 + \bar{\alpha} \bar{x}^2$$

zodat

$$cov(x,y) = \bar{\alpha} \sigma_x^2$$

Correlatie tussen x en y

De correlatie tussen x en y (γ) is dan

$$\gamma = \bar{\alpha} \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

bewijs:

per definitie

$$\gamma = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

met de bovenstaande resultaten volgt

$$\gamma = \frac{\bar{\alpha} \sigma_x^2}{\sigma_x \sigma_y}$$

zodat

$$\gamma = \bar{\alpha} \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

APPENDIX B

Onregelmatig gedrag van het berekende golfbeeld

Bij het toepassen van de beschreven methodologie bleken er problemen te ontstaan in de zin dat er onverwachte resultaten ontstonden. Zo bleek bijvoorbeeld dat incidenteel de significante golfhoogte bij de kust in het golfmodel HISWA afnam in plaats van toenam bij een geringe toename van de waterdiepte. Maar ook andere onverwachte variaties traden op. Dergelijke variaties zijn van groot belang voor het berekenen van gevoeligheden en foutenvoortplantingen waarop deze studie gebaseerd is. Drie mogelijke oorzaken zijn onderzocht:

Oorzaak A Aanvankelijk kwam in de studie incidenteel een opvallende negatieve gevoeligheid voor. Met name bleek een enkele maal de significante golfhoogte bij de kust af te nemen als de golfhoogte op diep water toeneemt. De volgende mogelijke oorzaak wordt hier onderzocht:

In de analyse wordt de golfhoogte als een onafhankelijke grootte behandeld. D.w.z. hij wordt gevarieerd zonder dat tegelijkertijd andere parameters worden gevarieerd. Dit kan onrealistisch zijn. In HISWA zal, als de diepwater significante golfhoogte als randvoorwaarde toeneemt (en de gemiddelde golfperiode als randvoorwaarde niet varieert), door breken en bodemwrijving meer dissipatie optreden. Deze energie wordt in HISWA uitsluitend onttrokken aan de lage frequenties waardoor dus de gemiddelde periode in het voorspellingsgebied korter wordt. Dit kan tot gevolg hebben dat het refractie patroon verschuift waardoor ook de significante golfhoogte op een bepaalde lokaties kan afnemen. Zo zou een negatieve gevoeligheid kunnen ontstaan.

Om dit scenario na te gaan is een HISWA berekening voor de Haringvliet uitgevoerd voor

- (a) de basissituatie met $H_s = 5\text{ m}$, $\bar{T} = 9\text{ s}$, als randvoorwaarde,
- (b) de basissituatie met $H_s = 6\text{ m}$, $\bar{T} = 9\text{ s}$, als randvoorwaarde.

De resultaten zijn gegeven in Figs. B.1 en B.2. Het meest opvallende is dat inderdaad HISWA een lagere significante golfhoogte geeft bij de Haringvlietssluisen bij een hogere significante golfhoogte op diep water (en niet alleen bij de Haringvlietssluisen maar overal in het zuidelijk deel van het getekende gebied: alle stippellijnen liggen iets westelijker dan de overeenkomstige getrokken lijnen, Fig. B.1).

Als het bovengeschetste scenario juist is, dan zou de gemiddelde golfperiode in de basissituatie groter moeten zijn dan in het geval met de 6 m significante golfhoogte. Dit blijkt inderdaad zo te zijn over het gehele getekende gebied (Fig. B.2). Dit is b.v. goed te zien aan de iso-lijnen van de 8.1 s. De stippellijn ligt ruim ten westen van de getrokken iso-lijn zodat in de basissituatie de gemiddelde periode reeds op dieper water (links boven in de figuur) groter is bij een lagere significante golfhoogte op diep water. Vergelijk ook de iso-lijnen van de 5.7 s (voor de sluisen). Ook daar blijkt duidelijk dat de gemiddelde golfperiode groter is bij een lagere significante golfhoogte op diep water. Of het refractiepatroon hierdoor verschuift kan niet goed worden vastgesteld omdat alleen de gemiddelde golfrichting beschikbaar is die bijzonder ongevoelig is voor variaties in het refractiepatroon. Dit blijkt ook uit het feit dat er geen verschillen te zien zijn in de richtingsvectoren (en in de figuur dus ook niet aangegeven zijn).

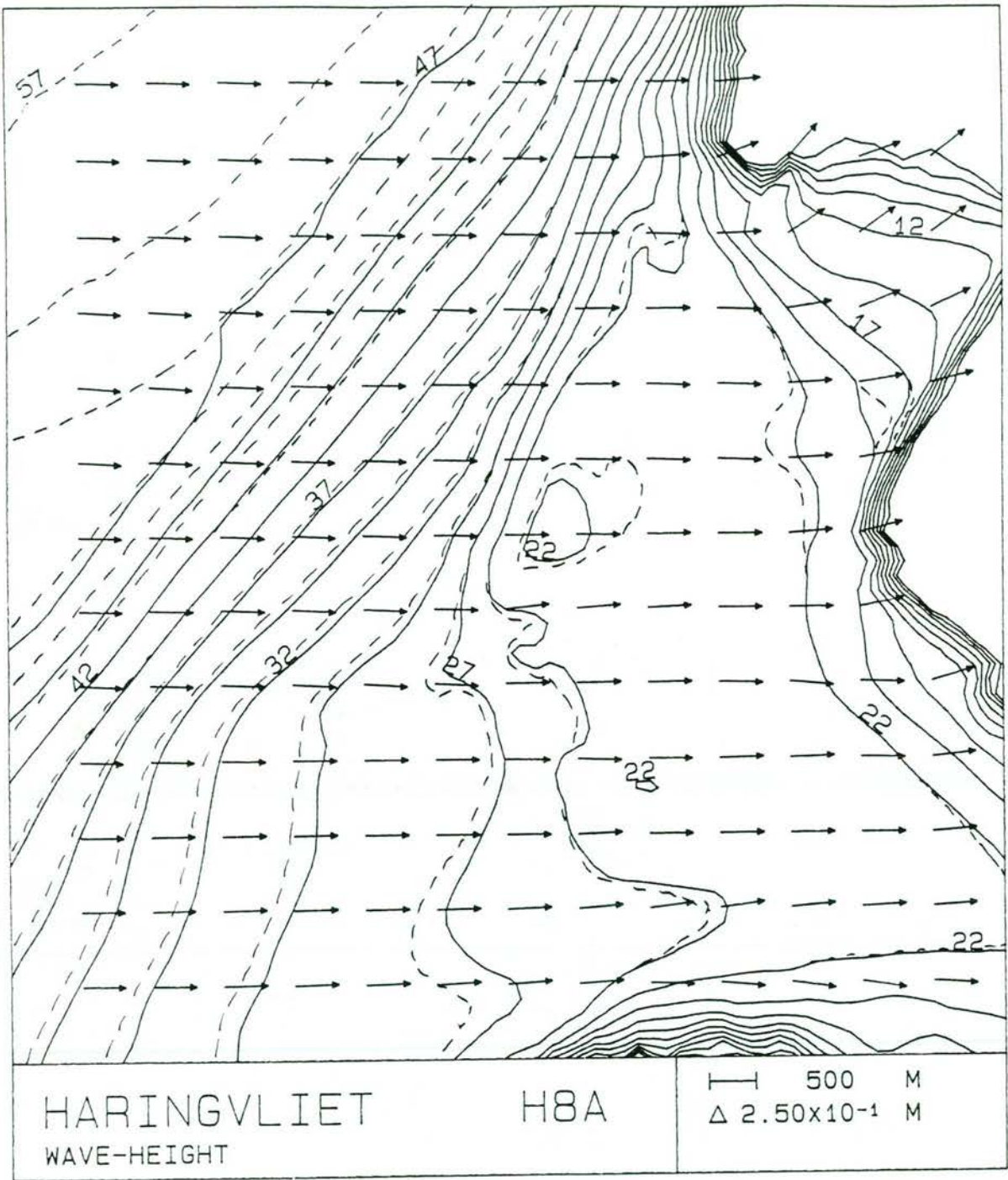


Fig. B.1 De significante golfhoogte in de Haringvliet. Getrokken iso-lijnen geven de basissituatie (5 m diepwater significante golfhoogte) en de gestippelde iso-lijnen geven de situatie met 6 m significante golfhoogte op diep water. De diepwater gemiddelde golfperiode is identiek in beide gevallen (9 s).

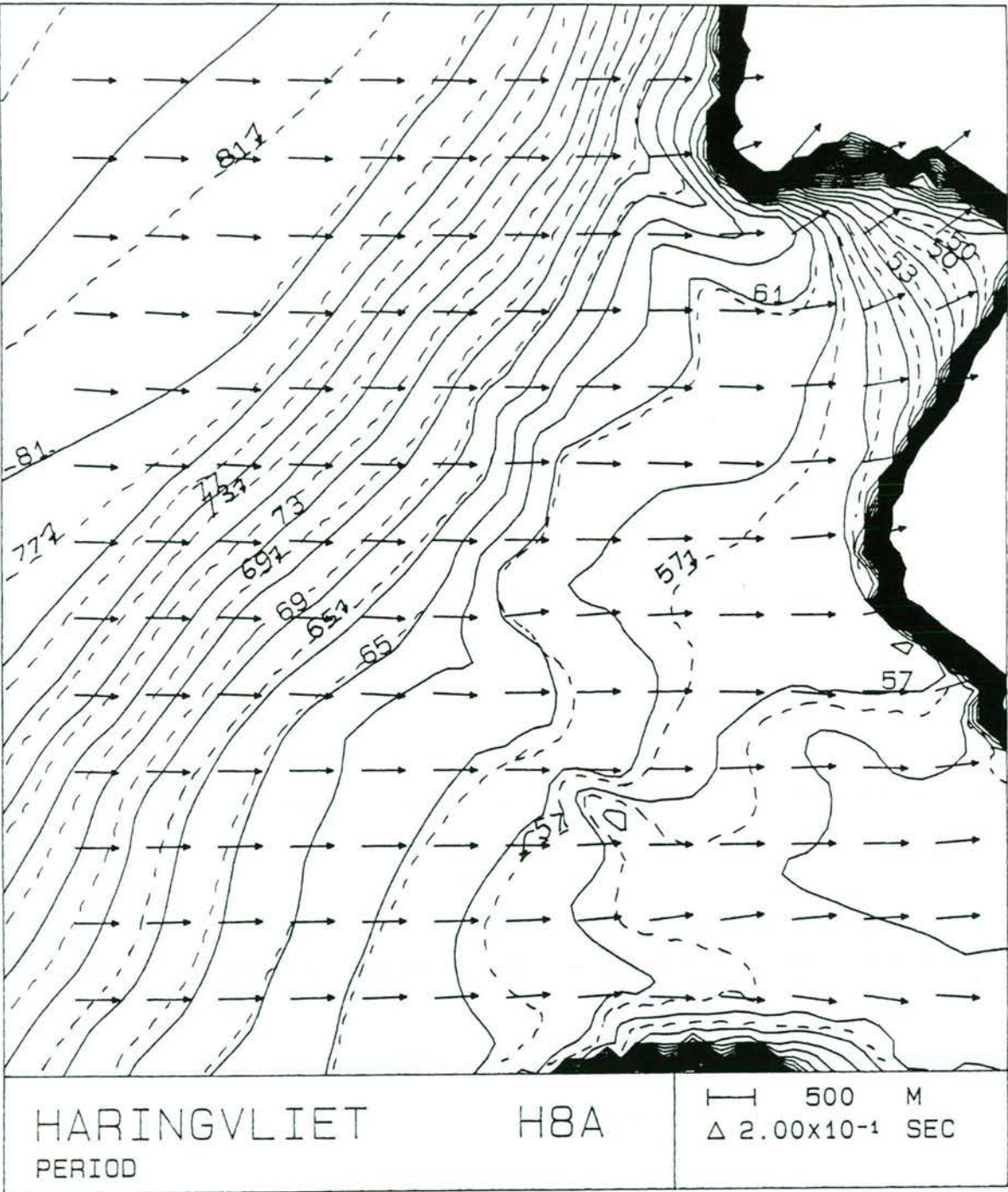


Fig. B.2 De gemiddelde golfperiode in de Haringvliet. Getrokken iso-lijnen geven de basissituatie (5 m diepwater significante golfhoogte) en de gestippelde iso-lijnen geven de situatie met 6 m significante golfhoogte op diep water. De diepwater gemiddelde golfperiode is identiek in beide gevallen (9s).

Oorzaak B Nadat de gemiddelde golfperiode op diep water niet meer gebruikt werd als onafhankelijk te variëren parameter bleken er nog steeds onverwachte variaties op te treden. Sommige daarvan waren dermate klein dat de mogelijkheid van numerieke ruis onderzocht is. Daartoe is een 64-bits versie van HISWA ontwikkeld (in plaats van de oorspronkelijke 32-bits versie). Echter, bij de heranalyse van de gehele studie met de 64-bits versie bleek er geen verschil op te treden met de resultaten met de 32-bits versie.

Oorzaak C De onverwachte resultaten ontstonden bij het gebruiken van de standaard waarde voor de kleine afwijking van $0.1\sigma_z$ (zoals hierboven aangegeven). Onderzocht is of andere waarden andere resultaten zouden geven. Daartoe is in de Westerschelde een aantal lokaties geanalyseerd, gelegen op de hoofd-as van diep water naar ondiep water (zie Fig...). HISWA berekeningen zijn uitgevoerd om in een aantal lokaties op deze raai het verloop te bepalen van de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode bij een geleidelijke stijging van de waterstand. De resultaten voor een totale waterstandverandering van 5.5 m tot 6.5 m (NAP) zijn gegeven in Fig. B4 en Fig. B5. Het blijkt uit deze resultaten dat het golfveld in HISWA zich niet regelmatig (monotoon) gedraagt. Een kleine variatie in de waterstand blijkt een variatie te geven in de significante golfhoogte en gemiddelde golfperiode die sterk afhangt van de grootte van die kleine variatie en van de waterstand zelf. Dit betekent dat het bepalen van de afgeleide $\partial H_s / \partial Z_i$ afhankelijk is van de keuzen van de kleine variatie in de waterstand en van de waterstand zelf. Een voorbeeld wordt gegeven in Fig. B3: de schatting van de afgeleide gebaseerd op het traject a - b is belangrijk verschillend van de schatting voor traject a - c of a - d (uit Fig. B4, panel d).

Omdat bleek dat het golfbeeld in HISWA lokaal niet-linear is, is in plaats van een kleine verandering van de omgevingsparameter gelijk aan $0.1\sigma_z$ gebruik gemaakt van een vrij grote verandering nl. σ_z . Hiermee wordt een schatting van de afgeleide $\partial H_s / \partial Z_i$ verkregen over een traject dat fysisch relevant lijkt. Een nadeel van deze keuze is dat de schatting van de afgeleide afhankelijk is van de waarde van σ_z , waardoor afgeleiden die essentieel identiek zijn verschillende waarden kunnen krijgen (b.v. de zeespiegelrijzing en de windopzet zouden gelijke afgeleiden moeten hebben; dat is in deze studie niet het geval omdat de waarden voor $\partial H_s / \partial Z_i$ voor deze parameters verschillend zijn).

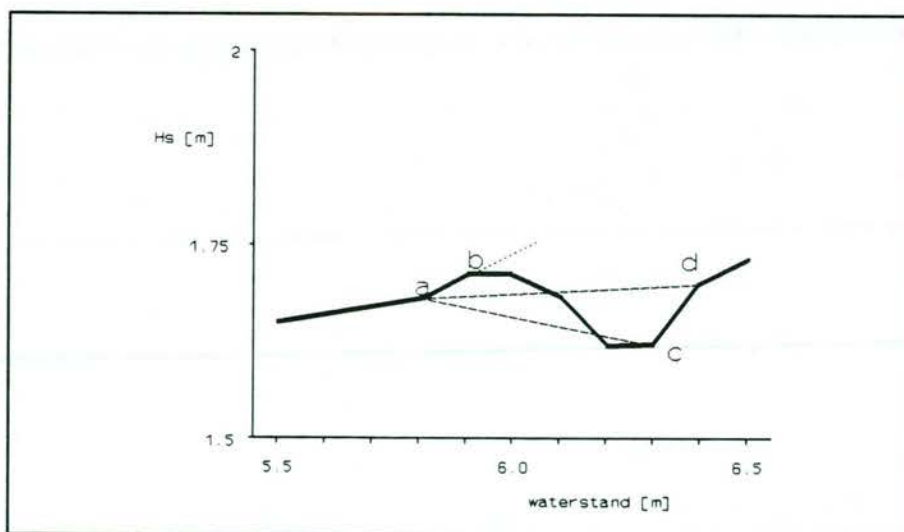


Fig. B3 De significante golfhoogte als functie van de waterstand in de Westerschelde (zie Fig. 2 d) met drie afgeleiden: a - b, a - c en a - d.

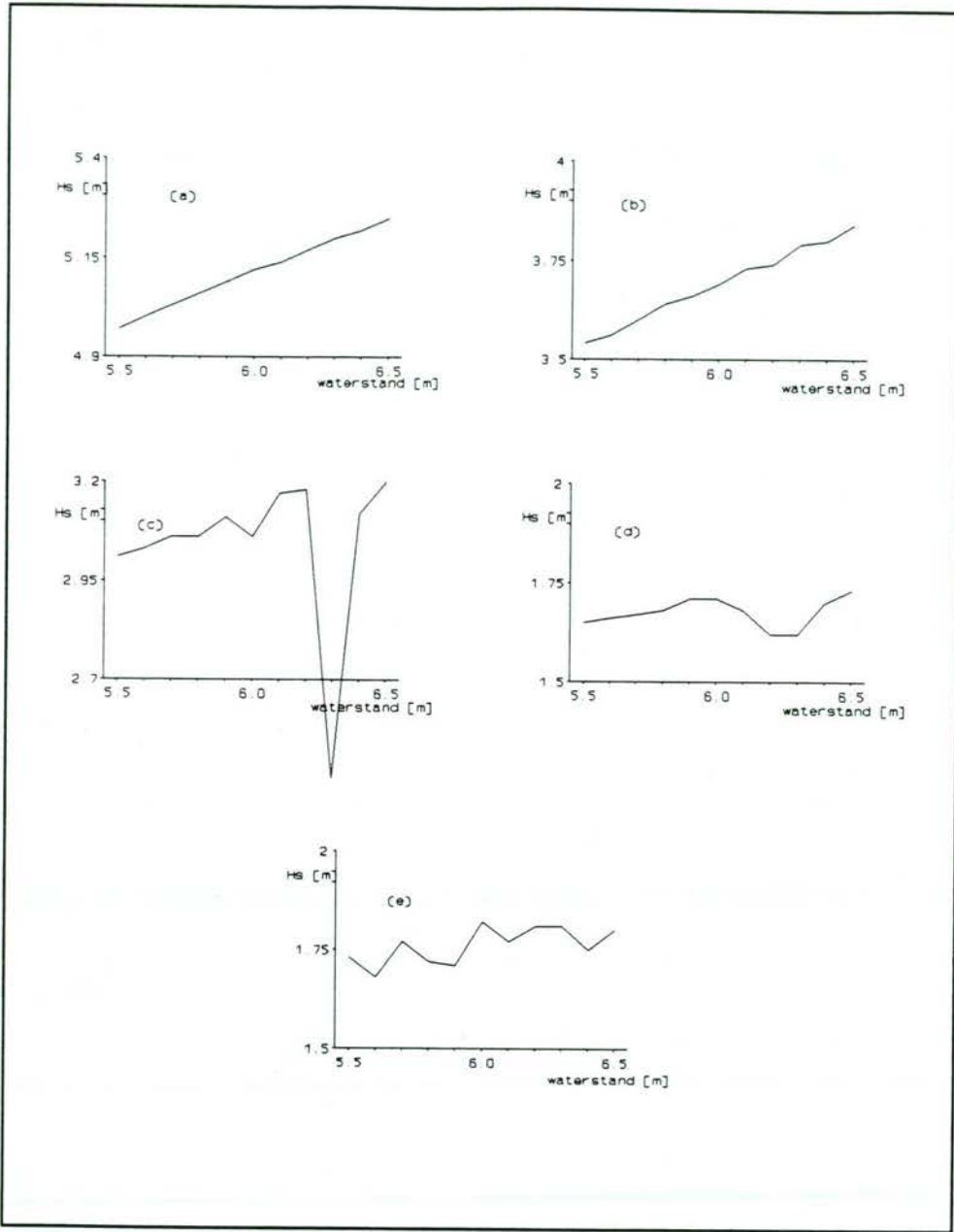


Fig. B.4 Significante golfhoogte op verschillende lokaties langs de hoofd-raai in de Westerschelde (equidistant tussen begin, panel a, en einde van de raai, panel e)

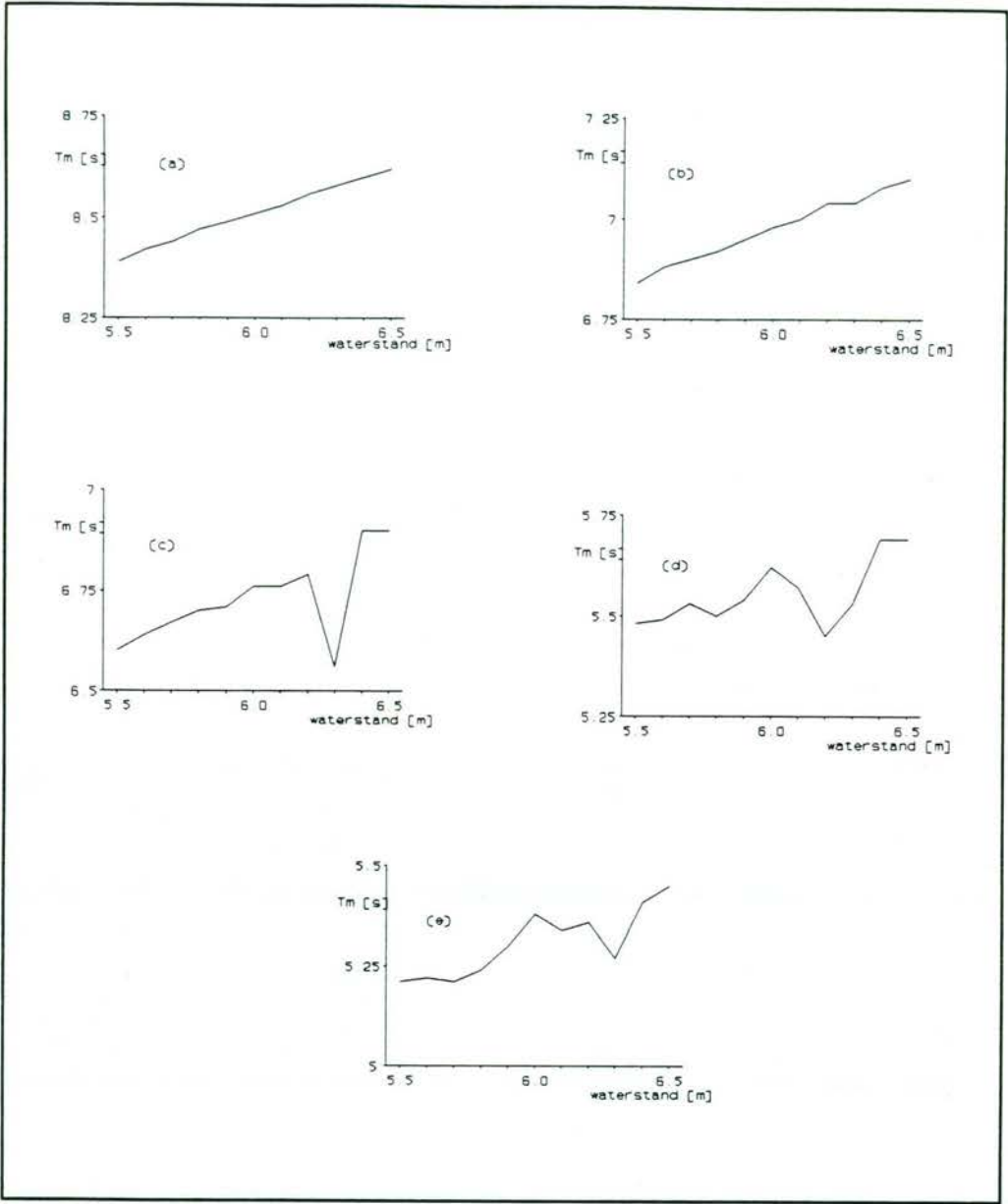


Fig. B.5 Gemiddelde golfperiode op verschillende lokaties langs de hoofd-raai in de Westerschelde (equidistant tussen begin, panel a, en einde van de raai, panel e, zie ook Fig. 7.1)

