

**Schematisatie van de  
belastingduur in Steentoets**





## **Schematisatie van de belastingduur in Steentoets**

G.C. Mourik

1202551-007



**Titel**

Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat, Waterdienst 1202551-007

**Project****Pagina's**

74

**Trefwoorden**

STEENTOETS2008, steenzetting, belastingduur, stabiliteit

**Samenvatting**

De kennis betreffende de invloed van de belastingduur op de stabiliteit van steenzettingen komt voort uit modelonderzoek, dat is uitgevoerd met een vaste waterstand en gelijke golfcondities. In werkelijkheid zullen de waterstand en golfcondities variëren tijdens een storm. Er is behoefte een brug te slaan tussen de kennis uit dat modelonderzoek met constante omstandigheden, en de praktijk met variërende omstandigheden. De eerste aanzet, die daarvoor is opgezet voor STEENTOETS2008 (Klein Breteler, 2009), kent echter nog een aantal tekortkomingen.





In de rapportage zijn de tekortkomingen in beeld gebracht en zijn mogelijke aanpassingen beschreven ter verbetering of optimalisatie daarvan. Per afzonderlijke aanpassing is in cases voor specifieke situaties geschat hoe groot de invloed van de aanpassing is op de belastingduur en de stabiliteit van de steenzettingen. Afhankelijk van de resultaten van de cases wordt al dan niet aanbevolen de mogelijk aanpassingen in Steentoets op te nemen. Voor de keuze is de invloed op de stabiliteit het belangrijkste.

De meeste verbeteringen vergen echter een verandering van het wettelijk toetsinstrumentarium ( $WTI = VTV + HR$ ), hetgeen veel tijd vergt. Voor de korte termijn blijven er daarom slechts twee over, namelijk c en h. Aanbevolen wordt die veranderingen door te voeren in Steentoets.

**Referenties**

Contract 31037864 van 26-04-2010

Contactpersoon RWS: ir. A. Bizzarri

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	jan. 2010	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
1.1	sep. 2010	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
2.0	feb. 2011	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>Lijst van Tabellen</b>	<b>i</b>
<b>Lijst van Figuren</b>	<b>iii</b>
<b>Lijst van Symbolen</b>	<b>v</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Berekening belastingduur in STEENTOETS2008</b>	<b>3</b>
2.1 Oosterschelde, bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5	4
2.1.1 Oosterschelde	4
2.1.2 Bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5	4
2.2 Overige gebieden	4
2.2.1 Stormduur	5
2.2.2 Locatie maximale stijghoogte	5
2.2.3 Relevante waterstandrange	6
2.2.4 Waterstandsverloop	6
2.2.5 Belastingduur tijdintervallen	7
2.2.6 Belastingduur	8
<b>3 Mogelijke aanpassingen in berekening van belastingduur</b>	<b>9</b>
3.1 Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater	9
3.2 Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden	11
3.3 Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen	12
3.4 Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd	12
3.5 Golfsteilheid verloopt met de tijd	13
3.6 Hoek van golfaanval verloopt met de tijd	14
3.7 Variërende stormduur	14
3.8 Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken	15
<b>4 Schatting van de invloed van mogelijke aanpassingen</b>	<b>17</b>
4.1 Case a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater	18
4.1.1 STEENTOETS2008	18
4.1.2 Mogelijke aanpassingen	18
4.1.3 Case a.1: Waterstandsverloop uitgaande van vaste stormopzet	19
4.1.4 Case a.2: Waterstandsverloop waarbij hoogste waterstand gelijk is aan toetspeil	22
4.1.5 Case a.3: Omhullende belastingduur	25
4.2 Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden	30
4.2.1 STEENTOETS2008	30
4.2.2 Aanpassing	31
4.2.3 Werkwijze	31
4.2.4 Resultaten	31
4.3 Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen	33
4.3.1 STEENTOETS2008	33
4.3.2 Aanpassing	34
4.3.3 Werkwijze	35

4.3.4	Resultaten	36
4.4	Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd	37
4.4.1	STEENTOETS2008	37
4.4.2	Aanpassing	37
4.4.3	Werkwijze	40
4.4.4	Resultaten	40
4.5	Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd	42
4.5.1	STEENTOETS2008	42
4.5.2	Aanpassing	42
4.5.3	Werkwijze	46
4.5.4	Resultaten	47
4.6	Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd	48
4.6.1	STEENTOETS2008	48
4.6.2	Aanpassing	48
4.6.3	Werkwijze	50
4.6.4	Resultaten	50
4.7	Case g: Variërende stormduur	52
4.7.1	STEENTOETS2008	52
4.7.2	Aanpassing	52
4.7.3	Werkwijze	52
4.7.4	Resultaten	52
4.8	Case h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken	53
4.8.1	STEENTOETS2008	53
4.8.2	Aanpassing	54
4.8.3	Werkwijze	55
4.8.4	Resultaten	56
<b>5</b>	<b>Analyse van de resultaten</b>	<b>57</b>
5.1	Case a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater	57
5.1.1	Case a.1	57
5.1.2	Case a.2	58
5.1.3	Case a.3	58
5.2	Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden	58
5.3	Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen	59
5.4	Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd	60
5.5	Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd	61
5.6	Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd	61
5.7	Case g: Variërende stormduur	62
5.8	Case h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken	63
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>65</b>
6.1	a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater	66
6.2	b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden	66
6.3	c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen	66
6.4	d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd	67
6.5	e: Golfsteilheid verloopt met de tijd	67
6.6	f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd	67
6.7	g: Variërende stormduur	67
6.8	h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken	68
6.9	Overzicht aanbevelingen	68



## 7 Referenties

71

### Bijlage(n)

## A Bijlagen

A-1

Bijlage A.1	Resultaten Case a.1
Bijlage A.2	Resultaten Case a.2
Bijlage A.3.1	Resultaten Case a.3
Bijlage A.3.2	Resultaten Case a.3
Bijlage A.3.3	Resultaten Case a.3
Bijlage A.3.4	Resultaten Case a.3
Bijlage A.3.5	Resultaten Case a.3
Bijlage B.1	Resultaten Case b
Bijlage C.1	Resultaten Case c
Bijlage C.2	Resultaten Case c
Bijlage C.3	Resultaten Case c
Bijlage D.1	Resultaten Case d
Bijlage D.2	Resultaten Case d
Bijlage E.1	Resultaten Case e
Bijlage E.2	Resultaten Case e
Bijlage F.1	Resultaten Case f
Bijlage F.2	Resultaten Case f
Bijlage F.3	Resultaten Case f
Bijlage F.4	Resultaten Case f
Bijlage G.1	Resultaten Case g
Bijlage H.1	Resultaten Case h
Bijlage H.2	Resultaten Case h
Bijlage I.1	Hydraulische parameters en geometrie van steenzetting (betonzuilen)
Bijlage I.2	Hydraulische parameters en geometrie van steenzetting (blokken)



## Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Stormduur en stormverloop in de verschillende Nederlandse watersystemen	3
Tabel 4.1	Resultaten 'Case a.1: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.	21
Tabel 4.2	Resultaten 'Case a.2: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.	24
Tabel 4.3	Golfcondities waarmee werd gerekend in Steentoets2008.a.3.	28
Tabel 4.4	Resultaten 'Case a.3: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.	29
Tabel 4.5	Toename blokdikte t.o.v. standaard case met blokdikte van 30 cm.	30
Tabel 4.6	Resultaten 'Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden'.	32
Tabel 4.7	Resultaten 'Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen'.	36
Tabel 4.8	Resultaten 'Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd'.	41
Tabel 4.9	Resultaten 'Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd'.	47
Tabel 4.10	Resultaten 'Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd'.	51
Tabel 4.11	Resultaten 'Case g: Variërende stormduur'.	53
Tabel 6.1	Overzicht van de resultaten (* = minieme invloed, ** = kleine invloed, *** = matige invloed)	65



## Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Belastingduur in Oosterschelde, afhankelijk van de waterstand.	4
Figuur 2.2	Maximaal stijghoogteverschil.	5
Figuur 2.3	Relevante waterstandrange.	6
Figuur 2.4	Waterstandsverloop in Nederlandse watersystemen (m.u.v. rivierengebieden en Oosterschelde) (schematisch).	7
Figuur 2.5	Belastingduur tijdintervallen (schematisch).	7
Figuur 3.1	Waterstandsverloop (rood) bij faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater, uitgaande van een vaste stormopzet (schematisch).	10
Figuur 3.2	Waterstandsverloop (blauw) bij faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater, waarbij de topwaterstand gelijk is aan het toetspeil (schematisch).	10
Figuur 3.3	Belastingduur, afhankelijk van hoogte van topwaterstand (schematisch).	11
Figuur 3.4	Invloed van verlopende golfhoogte op positie van waterstandrange (schematisch).	13
Figuur 3.5	Scherpe en diffuse grenzen van relevante waterstandrange (schematisch).	14
Figuur 4.1	Relatie top stormopzet en faseverschil.	23
Figuur 4.2	Grafiek 'omhullende belastingduur' uit Van der Sande(2010),	26
Figuur 4.3	Grafiek 'omhullende belastingduur' t.b.v. case a.3,	27
Figuur 4.4	Waterstandsverlopen bij lagere topwaterstand (schematisch).	32
Figuur 4.5	Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 1.	34
Figuur 4.6	Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 2.	35
Figuur 4.7	Stijghoogteverloop tijdens een golffront.	35
Figuur 4.8	Invloed van niveau bovenste overgangsconstructie op stabiliteit van betonzuilensteenzetting.	41
Figuur 4.9	Relatie tussen golfhoogte en stabiliteitsgetal (steenzetting: betonzuilen)	43
Figuur 4.10	Relatie tussen golfhoogte en stabiliteitsgetal (steenzetting: blokken)	44
Figuur 4.11	Relatie tussen bezwijkgolfhoogte en golfsteilheid (steenzetting: blokken)	45
Figuur 4.12	Discontinue grenzen relevante waterstandrange in STEENTOETS2008.	54
Figuur 4.13	Grenzen relevante waterstandrange in Steentoets2008.h.	54



## Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
$\alpha$	$^{\circ}$	Taludhelling van de te toetsen steenzetting
$\beta$	$^{\circ}$	Hoek van golfinval t.o.v. dijknormaal ( $0^{\circ}$ is loodrecht)
$\Lambda$	m	Leklengte
$\phi'$	m	Stijghoogte op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn
$\phi_b$	m	Hoogte van het stijghoogtefront
$\phi_{bklap}$	m	Hoogte van het front ten opzichte van de trog tijdens golfklappen
$\theta_f$	$^{\circ}$	Helling van het stijghoogtefront
$\phi_k$	-	Maximale stijghoogte t.o.v. de trog tijdens de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie
$\theta_{k20-50\%L}$	$^{\circ}$	Helling van de flank van het stijghoogteverloop aan de landzijde van de golfklap
$\theta_{k50-80\%k}$	$^{\circ}$	Helling van de flank van het stijghoogteverloop aan de zeezijde van de golfklap
$\phi_{min}$	m	Minimale stijghoogte aan de voet van het stijghoogtefront (altijd een negatieve waarde)
$\phi_{minklap}$	m	Stijghoogte in de trog tussen de golfklap en de restanten van het golffront
$\xi_{op}$	-	Brekerparameter
$\beta_{var}$	$^{\circ}$	Hoek van golfinval t.o.v. dijknormaal, verlopend met de tijd ( $0^{\circ}$ is loodrecht)
$B_{klap50\%}$	m	Breedte van de golfklap (langs het talud gemeten)
$B_{trog20\%}$	m	Breedte van de trog tussen de golfklap en de restanten van het golffront, gemeten op 20% van de fronthoogte
$d_l$	m	Laagdikte op het talud ter plaatse van de golfklap
$f_{\beta}$	-	Invloedsfactor voor scheve golfaanval, waarbij $\beta$ constant is
$f_{duur}$	-	Invloedsfactor voor diffuus verloop van grenzen relevante waterstandrange
$f_{golfrichting}$	-	Invloedsfactor voor scheve golfaanval, waarbij $\beta$ verloopt in de tijd
$f_{gt}$	-	Stabiliteitsgetal (stabiliteit is voldoende als $f_{gt} \geq 1,00$ )
$f_{Hs}$	-	Invloedsfactor voor verlopende golfhoogte
$f_{Hs,bezwijk}$	-	Invloedsfactor voor verlopende bezwijkgolfhoogte
$f_{tijd}$	-	Invloedsfactor voor effectiviteit belastingduur
$h$	m, NAP+	Waterstand
$h_{actueel}$	m, NAP+	Actuele waterstand tijdens waterstandverlagingsstap
$h_{GHW}$	m, NAP+	Gemiddeld hoogwater
$h_H$	m, NAP+	Hoogste waterstand die nog een belasting geeft
$h_L$	m, NAP+	Laagste waterstand die nog een belasting geeft
$h_{lt}$	m, NAP+	Hoogte van waterstandsverloop, behorende bij een topwaterstand lager dan $h_{toets}$
$h_{max}$	m, NAP+	Maximale hoogte van het waterstandsverloop (uitgaande van vaste stormopzet)
$h_{MHW}$	m, NAP+	Maatgevend hoogwater
$h_{MWS}$	m, NAP+	Maatgevende waterstand
$h_{opzet}$	m	Lokale waterstandverhoging als gevolg van de door de wind op

Symbol	Eenheid	Betekenis
		een watermassa uitgeoefende kracht
$H_s$	m	Significante golfhoogte
$H_{s,bezwijk}$	m	Bezwijkgolfhoogte (heeft als resultaat: $f_{gt} = 1$ )
$H_{s,bezwijk,midden}$	m	Bezwijkgolfhoogte in midden van de storm
$H_{s,f}$	m	Significante golfhoogte, verlopend met $h_{opzet}$ (op $t = 0$ uur geldt: $H_{s,f} = H_s$ )
$H_{s,h,actueel}$	m	Significante golfhoogte, behorende bij $h_{actueel}$
$h_{toets}$	m, NAP+	Toetspeil
$H_{x\%}$	m	Golfhoogte met een overschrijdingspercentage van $x\%$ (volgens Rayleigh-verdeling)
$H_{x\%,f}$	m	Golfhoogte met een overschrijdingspercentage van $x\%$ (volgens Rayleigh-verdeling), verlopend met $s_{op}$
$i$	-	Nummer van karakteristieke locatie
$k$	m	Verhoging van de top van stormopzet t.g.v. faseverschil
$R_c$	-	Richtingscoëfficiënt
$R_{tij}$	m	Getijdenrange
$s_{op}$	-	Golfsteilheid
$s_{op,beginstorm}$	-	Golfsteilheid aan begin van storm
$s_{op,eindstorm}$	-	Golfsteilheid aan einde van storm
$s_{op,middenstorm}$	-	Golfsteilheid in midden van storm
$t$	uur	Tijdstip ( $t = 0$ uur in midden van de storm)
$t(1)$	uur	Begin van tijdstap
$t(2)$	uur	Einde van tijdstap
$t_1, t_2, t_3, \dots$	uur	Tijdintervallen waarin belasting op het talud optreedt
$t_{belast}$	uur	Belastingduur
$t_{fase}$	uur	Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater
$t_i$	uur	Midden van tijdstap
$t_{max}$	uur	Tijdstip behorende bij $h_{max}$
$t_{storm}$	uur	Stormduur
$X_{\phi max}$	m	Horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap
$X_m$	m	Horizontale afstand van de top van het front tot de waterlijn
$X_s$	m	Horizontale afstand van de voet van het stijghoogtefront tot de waterlijn (altijd een positieve waarde)
$Z_b$	m, NAP+	Niveau bovenbegrenzing van de te toetsen steenzetting
$Z_{belast}$	m, NAP+	Niveau op het talud waar de maximale belasting optreedt
$Z_o$	m, NAP+	Niveau onderbegrenzing van de te toetsen steenzetting



## 1 Inleiding

Uit modelproeven met een langdurige belasting is komen vast te staan dat steenzettingen langdurige belasting minder goed kunnen doorstaan dan kortdurende belastingen. Deze modelproeven, die zijn uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares (Klein Breteler en Eysink, 2005), zijn destijds uitgevoerd met een vrijwel constante waterstand en golfcondities. In werkelijkheid treden stormen op met een variabele duur en zullen tijdens een extreme storm zowel de waterstand als de golfcondities variëren.

Daarom is er behoefte om een brug te slaan tussen de kennis uit het modelonderzoek, die van toepassing is op constante omstandigheden, en de praktijk met variërende omstandigheden.

Een eerste aanzet voor het vertalen van de variërende omstandigheden uit de praktijk naar een situatie met constante golfhoogte en waterstand is opgezet voor STEENTOETS2008 (Klein Breteler, 2009). Deze vertaling kent echter nog een aantal tekortkomingen.

Door Haskoning (Blom, 2007) is een groot aantal simulaties uitgevoerd om te komen tot een realistischere en betere methodiek, maar dat heeft nog niet tot algemeen toepasbare resultaten geleid. Voor zowel ontwerp als (geavanceerde) toetsing is een realistische, maar praktische rekenregel wenselijk.

Gezien de complexiteit van de problematiek is in de onderhavige rapportage Steentoets2008 als uitgangspunt gekozen, en zijn een aantal verbeterscenario's bekeken. Elk van de scenario's heeft een belangrijke invloed op de grootte van de belastingduur, maar voor de uiteindelijke beoordeling is met name gekeken naar de invloed op de stabiliteit van steenzettingen. Deze beoordeling is uitgevoerd aan de hand van een voorbeeld steenzetting van zuilen en een met blokken. Het blijkt dat een grote invloed op de belastingduur niet altijd ook een grote invloed op de stabiliteit geeft. Dat komt omdat een andere belastingduur vaak ook een andere maatgevende waterstand betekent, waardoor ook de golfcondities anders zijn.

De onderhavige rapportage geeft eerst in hoofdstuk 2 een omschrijving van de huidige rekenmethode in STEENTOETS2008. Vervolgens in hoofdstuk 3 de tekortkomingen in deze methode met daarbij mogelijke verbeterscenario's. In hoofdstuk 4 wordt in cases bepaald hoe groot de invloed is van de mogelijke aanpassingen. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de cases geanalyseerd en in hoofdstuk 6 volgen de conclusies en aanbevelingen.



## 2 Berekening belastingduur in STEENTOETS2008

Met behulp van STEENTOETS2008 kan de stabiliteit van steenzettingen beoordeeld worden. Een onderdeel van de stabiliteitsberekeningen wordt gevormd door de berekening van de belastingduur. De belastingduur is de tijd die gedurende een storm effectief meetelt bij het bepalen van de stabiliteit. In dit hoofdstuk wordt inzichtelijk gemaakt hoe de belastingduur in STEENTOETS2008, versie 1.01, wordt berekend.

De invloed van de belastingduur wordt in STEENTOETS2008 bepaald voor de steenzettingen op een filterlaag. Dit zijn steenzettingen van het type 3 en 6, inclusief ingegoten steenzettingen en steenzettingen van Noorse steen.

Binnen het rekenproces voor het bepalen van de stabiliteit wordt de waterstand vanaf het toetspeil steeds een stapje verlaagd. In elke stap wordt voor de betreffende waterstand de stabiliteit van de steenzetting bepaald. Als onderdeel van die berekening wordt ook steeds de belastingduur berekend. Uiteindelijk worden de resultaten van alle waterstanden met elkaar vergeleken. De waterstand die uiteindelijk de laagste stabiliteit oplevert, wordt als maatgevende situatie beschouwd. De berekeningsresultaten die bij deze waterstand horen, worden door STEENTOETS2008 als uitvoer gegeven.

De grootte van de stabiliteit wordt in Steentoets weergegeven met het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$ . Hoe hoger dit getal, hoe hoger de stabiliteit. Als de waarde kleiner is dan 1, dan is de steenzetting niet stabiel.

watersysteem	Stormduur [uur]	Stormopzetverloop
Westerschelde	35	HR2006 fig. 2-10
Oosterschelde	35	Belastingduur afhankelijk van waterstand: $h > h_{toets}$ , dan $t_{belast} = 0$ uur Als $h_{toets} - 1 < h \leq h_{toets}$ , dan $t_{belast} = 5$ uur Als $h_{toets} - 2 \leq h \leq h_{toets} - 1$ , dan $t_{belast} = 25$ uur Als $h < h_{toets} - 2$ , dan $t_{belast} = 20$ uur
IJsselmeer	35	HR2006 fig. 2-10
Markermeer	35	HR2006 fig. 2-10
Randmeren	35	HR2006 fig. 2-10
Noordzee	35	HR2006 fig. 2-10
Waddenzee	45	HR2006 fig. 2-10
Benedenrivieren, deelgebied 1 en 2	35	HR2006 fig. 2-6
Benedenrivieren, deelgebied 3 t/m 5	12	Constante waterstand, $t_{belast} = 12$ uur
Bovenrivieren	12	Constante waterstand, $t_{belast} = 12$ uur
Ander gebied	vrij te kiezen	HR2006 fig. 2-10 (peil A = NAP)

Tabel 2.1 Stormduur en stormverloop in de verschillende Nederlandse watersystemen

Afhankelijk van het Nederlandse watersysteem wordt de belastingduur berekend volgens een bepaalde rekenprocedure. In dit hoofdstuk wordt de rekenprocedure beschreven, die doorlopen wordt bij één waterstandstap. De actuele waterstand in één waterstandstap wordt  $h_{actueel}$  genoemd. De actuele waterstand die uiteindelijk de laagste stabiliteit oplevert, wordt de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  genoemd.

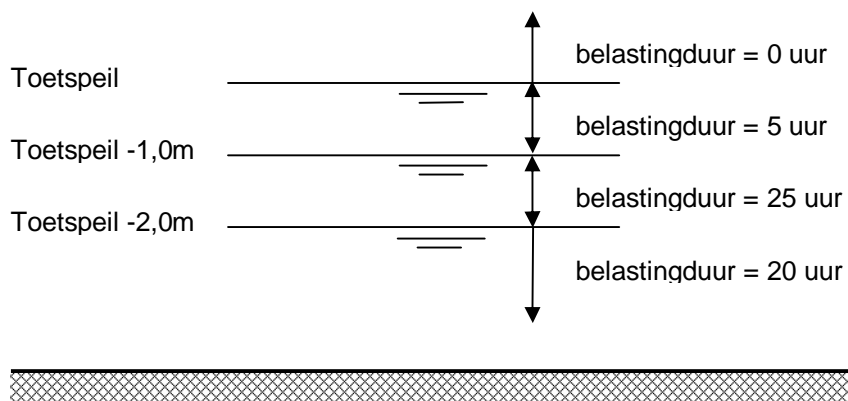
Merk op dat in STEENTOETS2008 en in Klein Breteler (2009) zowel de waterstand in één waterstandstap als de uiteindelijke maatgevende waterstand worden aangeduid als de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$ . Om het onderscheid daartussen inzichtelijker te maken, wordt daar in deze rapportage vanaf geweken.

Belangrijke uitgangspunten voor het bepalen van de belastingduur  $t_{belast}$  zijn de stormduur  $t_{storm}$  en het stormopzetverloop. Deze zijn voor de toetsing per watersysteem vastgelegd in de HR2006. Tabel 2.1 geeft per watersysteem de daarbij horende stormduur en het stormverloop. Bij het bepalen van de belastingduur wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds de Oosterschelde, bovenrivieren en benedenrivieren dg. (deelgebied) 3-5 (paragraaf 2.1) en anderzijds de overige gebieden (paragraaf 2.2).

## 2.1 Oosterschelde, bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5

### 2.1.1 Oosterschelde

In geval van een verwachting van extreem hoogwater wordt de Oosterscheldekering gesloten. In bijlage G van Klein Breteler (2009) zijn de verschillende mogelijke sluitscenario's beschreven. Afhankelijk van de waterstand, behorende bij de verschillende sluitprocedures, wordt in Klein Breteler (2009) aangegeven met welke belastingduur gerekend wordt bij de wettelijke toetsing. Zowel Tabel 2.1 als Figuur 2.1 geeft per waterstand de bijbehorende belastingduur. Daarin is  $h$  de waterstand [m, NAP+] en  $h_{toets}$  het toetspeil [m, NAP+].



Figuur 2.1 Belastingduur in Oosterschelde, afhankelijk van de waterstand.

### 2.1.2 Bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5

Voor de bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5 wordt het waterstandsverloop gedomineerd door de rivierafvoer. Voor deze gebieden wordt conform de VTV2006 (pag. 102) een vaste belastingduur aangehouden van 12 uur.

## 2.2 Overige gebieden

In alle Nederlandse watersystemen, anders dan de Oosterschelde, de bovenrivieren en benedenrivieren deelgebied 3-5, wordt de belastingduur berekend door achtereenvolgens de onderstaande stappen te doorlopen. De rekenstappen worden in de navolgende subparagrafen nader toegelicht.

In deze paragraaf wordt de rekenprocedure beschreven die doorlopen wordt bij één waterstandstap.

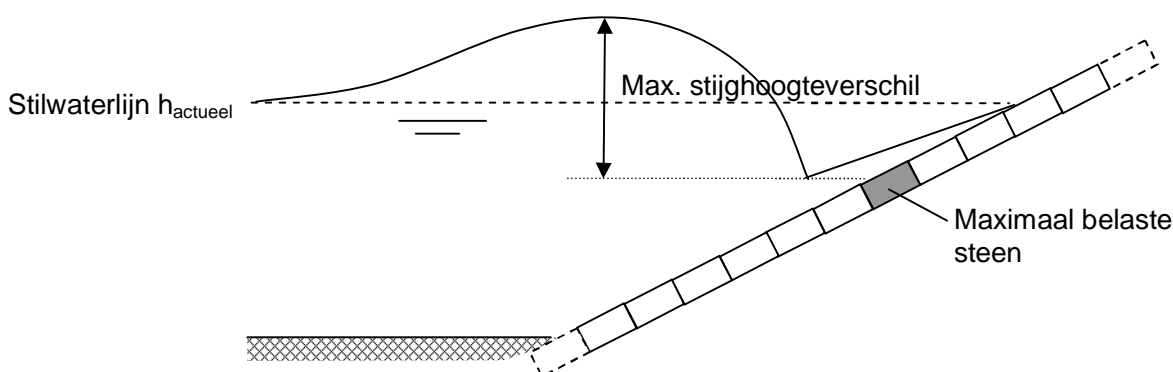
- Stormduur vaststellen voor het betreffende watersysteem (Tabel 2.1).
- Locatie op het talud bepalen waar het maximale stijghoogteverschil optreedt. Op deze locatie wordt het talud, bij de actuele waterstand  $h_{\text{actueel}}$ , het zwaarst belast. De locatie is afhankelijk van de taludhelling en de optredende golven (Figuur 2.2).
- Voor de zwaarst belaste locatie op het talud wordt bepaald welke waterstandrange een grote belasting geeft op die betreffende locatie (Figuur 2.3). Niet slechts één waterstand veroorzaakt een belasting, maar ook de waterstanden die net boven of onder de actuele waterstand  $h_{\text{actueel}}$  liggen, dragen daaraan bij. Deze range van belastende waterstanden wordt de relevante waterstandrange genoemd.
- Vervolgens wordt voor het betreffende watersysteem het waterstandsverloop bepaald. Dit waterstandsverloop is een superpositie van het tot een sinus vereenvoudigde getijde, indien van toepassing, en de standaard stormopzet uit de HR2006 (Figuur 2.4).
- Binnen het stormduurinterval wordt bepaald tijdens welke tijdsintervallen het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange valt (Figuur 2.5).
- Door alle afzonderlijke tijdsintervallen te sommeren, wordt de totale belastingduur berekend.

### 2.2.1 Stormduur

De stormduur is afhankelijk van het watersysteem, waarin de steenzetting zich bevindt. Tabel 2.1 geeft per watersysteem de bijbehorende stormduur.

### 2.2.2 Locatie maximale stijghoogte

Voor het berekenen van de belastingduur wordt de locatie op het talud geschat waar het maximale stijghoogteverschil optreedt. Daar is de belasting maximaal. De locatie met het maximale stijghoogteverschil wordt bepaald door de taludhelling, de actuele waterstand  $h_{\text{actueel}}$  en de golfparameters.



Figuur 2.2 Maximaal stijghoogteverschil.

Er zijn 5 verschillende locaties op het talud waar deze maximale belasting op zou kunnen treden:

- Zeewaarts van een golfklap van het type 1 (golfklap type 1 is het gevolg van een overstortende breker die op enige afstand van het front neerkomt).
- Landwaarts van een golfklap van het type 1.
- Landwaarts van de golfklap van het type 2 (golfklap type 2 is het gevolg van een golfklap op de voet van het front).

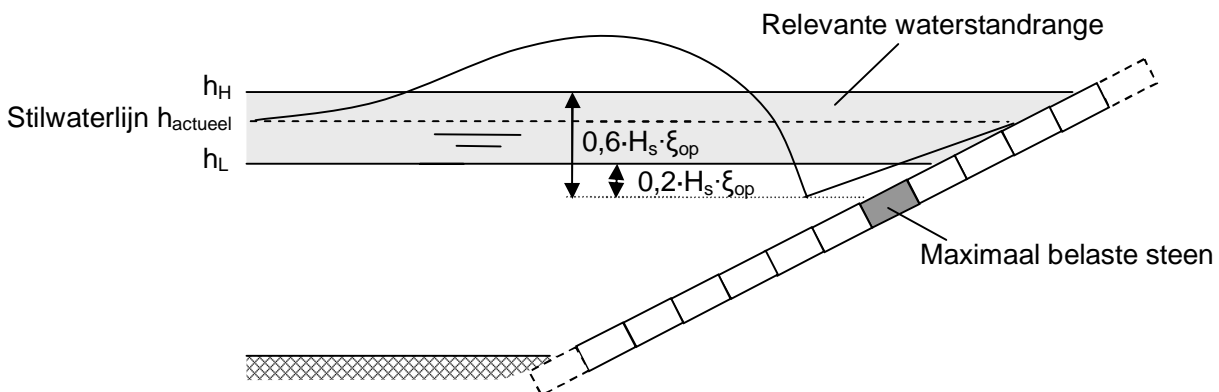
- Landwaarts, aan de voet van een hoog stijghoogtefront (een hoog stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een hoog stijghoogtefront en een relatief flauwe helling van het stijghoogtefront).
- Landwaarts, aan de voet van een steil stijghoogtefront (een steil stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een niet al te hoog stijghoogtefront en een relatief steile helling van het stijghoogtefront).

Doordat het waterstandsverloop tijdens een storm slechts een benadering betreft, worden in STEENTOETS2008 niet al deze 5 locaties berekend.

Bij steenzettingen met een leklengte langer dan 1,5 m en bij ingegoten steenzettingen wordt de locatie berekend aan de voet van het hoge stijghoogtefront. Bij een leklengte korter dan 1,5 m wordt een locatie berekend, die vrijwel in het midden ligt tussen de locaties zeewaarts en landwaarts van golfklap type 1.

### 2.2.3 Relevante waterstandrange

De maximaal belaste steen wordt niet slechts belast bij één waterstand, maar binnen een bepaalde waterstandrange. De ondergrens  $h_L$  van die relevante waterstandrange ligt  $0,2 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$  boven de maximaal belaste steen. De bovengrens  $h_H$  van de waterstandrange ligt  $0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$  boven de maximaal belaste steen. Voor  $\xi_{op}$  wordt maximaal 4 aangehouden. Zie Figuur 2.3. Voor het berekenen van de boven- en ondergrens van de waterstandrange wordt de significante golfhoogte gebruikt, behorende bij de actuele waterstand  $h_{actueel}$ .



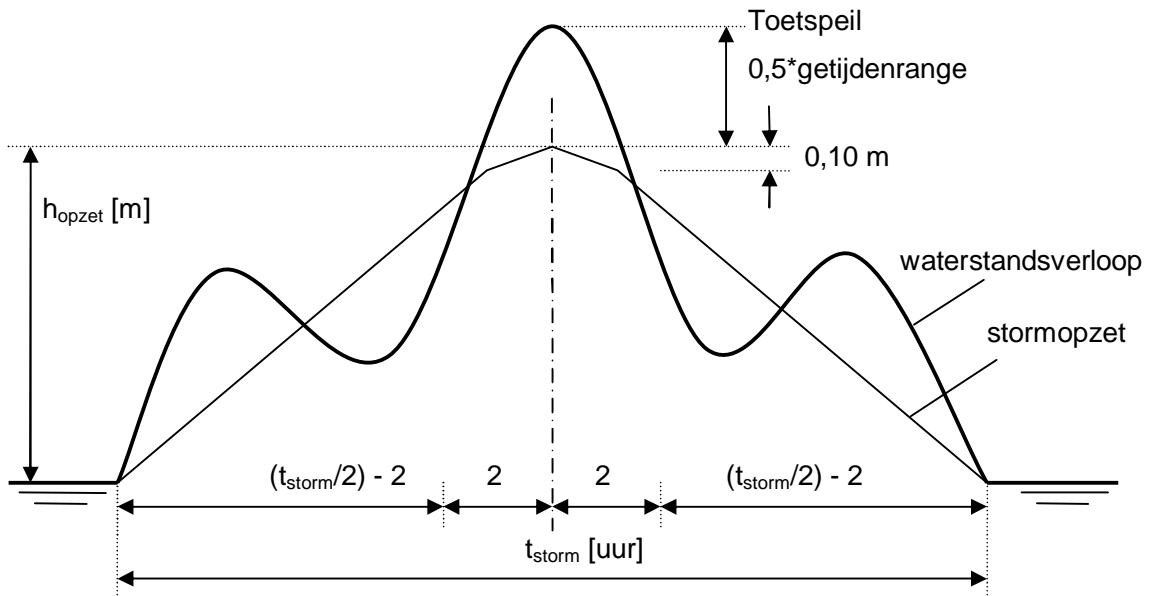
Figuur 2.3 Relevante waterstandrange.

### 2.2.4 Waterstandsverloop

Vervolgens wordt voor het betreffende watersysteem het waterstandsverloop bepaald. Het waterstandsverloop is een superpositie van het tot een sinus vereenvoudigde getijde en de stormopzet.

Voor benedenrivieren dg. (deelgebied) 1 en 2 wordt gebruik gemaakt van de standaard stormopzet volgens HR2006 fig. 2-6. Voor de overige watersystemen wordt gebruik gemaakt van de standaard stormopzet volgens HR2006 fig. 2-10. Figuur 2.4 geeft een schematisatie van het waterstandsverloop van de watersystemen, anders dan de Oosterschelde en de rivierengebieden.

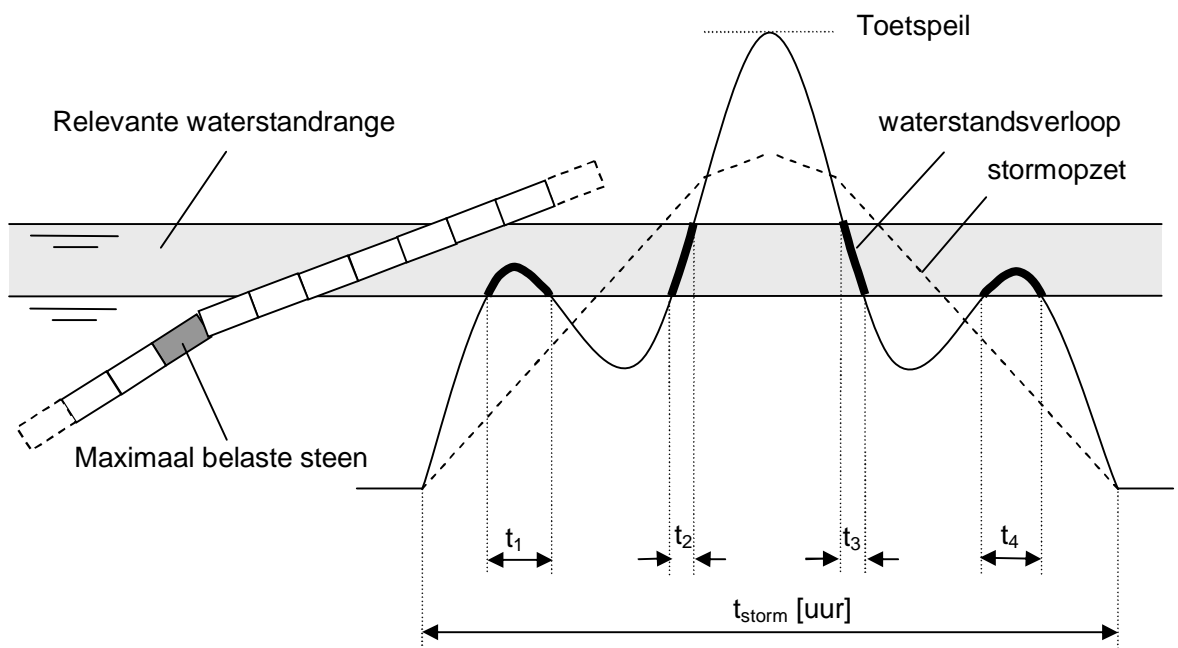
Conform de VTV wordt aangenomen dat de maximale stormopzet gelijktijdig optreedt met hoogwater. De waterstand, die op dat moment optreedt, wordt het toetspeil  $h_{toets}$  genoemd.



Figuur 2.4 Waterstandsverloop in Nederlandse watersystemen (m.u.v. rivierengebieden en Oosterschelde) (schematisch).

### 2.2.5 Belastingduur tijdintervallen

Wanneer het waterstandsverloop van het watersysteem is berekend, wordt bepaald voor welke tijdintervallen de curve van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange valt. Zie Figuur 2.5. Deze figuur geeft één van de vele mogelijke situaties weer. Afhankelijk van de hoogte van de stormopzet, de getijdenrange en de door STEENTOETS2008 berekende relevante waterstandrange worden meer of minder, en langere of kortere belastingduur tijdintervallen gevonden.



Figuur 2.5 Belastingduur tijdintervallen (schematisch).

## 2.2.6 Belastingduur

De belastingduur  $t_{\text{belast}}$  wordt vervolgens berekend door alle tijdintervallen te sommeren. In het geval van Figuur 2.5 wordt de totale belastingduur als volgt berekend:

$$t_{\text{belast}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \text{ [uur]}$$

Als minimale belastingduur wordt de tijdsduur van 1000 golven aangehouden.



### 3 Mogelijke aanpassingen in berekening van belastingduur

In STEENTOETS2008 wordt de belastingduur berekend zoals beschreven in hoofdstuk 2. De berekening van de belastingduur is weliswaar goed onderbouwd, maar wordt op diverse punten toch gekenmerkt door een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

In dit hoofdstuk wordt in hoofdlijnen toegelicht welke aspecten zijn vereenvoudigd en op welke wijze dat is gedaan. Tevens worden mogelijke aanpassingen voorgesteld, waarmee de nauwkeurigheid van STEENTOETS2008 vergroot kan worden. In hoofdstuk 4 worden de aanpassingen uitgewerkt en wordt per aanpassing onderzocht hoe groot de invloed daarvan is op de belastingduur en de stabiliteit van steenzettingen.

#### 3.1 Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater

In STEENTOETS2008 wordt gerekend met een waterstandsverloop, welke volgt uit een superpositie van de stormopzet en het tot een sinus vereenvoudigde getijde. Conform de VTV wordt in STEENTOETS2008 aangenomen dat de maximale stormopzet gelijktijdig optreedt met de maximale waterstand als gevolg van de getijdenwerking. Zie de zwarte lijn in Figuur 3.1 en Figuur 3.2. In de figuren geldt voor de belastingduur conform de VTV:

$$\text{Belastingduur (STEENTOETS2008)} = t_1 + t_2$$

In werkelijkheid zal de situatie conform de VTV niet vaak optreden. Hoogwater zal veelal enige tijd eerder of later optreden dan het moment waarop de maximale stormopzet is bereikt. Figuur 3.1 (rode lijn) en Figuur 3.2 (blauwe lijn) geven mogelijke waterstandsverlopen weer, zoals die in werkelijkheid kunnen optreden. Het tijdsverschil tussen de top van de stormopzet en hoogwater wordt in dit rapport het 'faseverschil' genoemd. In Figuur 3.1 en Figuur 3.2 is het faseverschil gelijk aan een halve getijdenperiode.

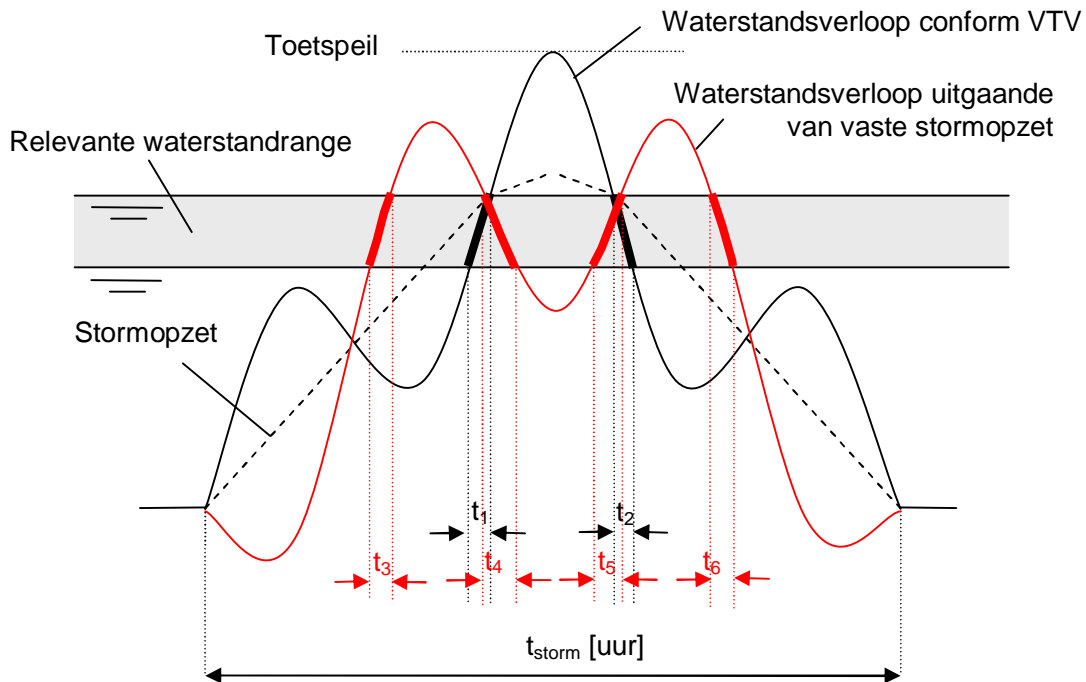
In deze case worden twee verschillende waterstandsverlopen beschouwd:

- Een waterstandsverloop uitgaande van een vaste stormopzet (Figuur 3.1, rode lijn):  
In dit geval wordt uitgegaan van een vaste stormopzet, waarvan de top berekend is door het toetspeil te verminderen met een halve getijdenamplitude. De getijdensinusoïde slingert om de stormopzet heen. Dit sluit echter niet precies aan bij de wijze waarop het toetspeil in het verleden is vastgesteld. Bij het bepalen van het toetspeil is een statistische analyse uitgevoerd van de hoogste waterstanden van stormen uit het verleden, en dat is vervolgens geëxtrapoleerd naar frequenties gelijk aan de norm. Het zou beter geweest zijn als in die statistische analyse de stormopzet zou zijn geanalyseerd (waterstand van historische stormen, minus het getij). Dan zou het toevallige faseverschil tussen stormopzet en getij beter verdisconteerd kunnen worden.

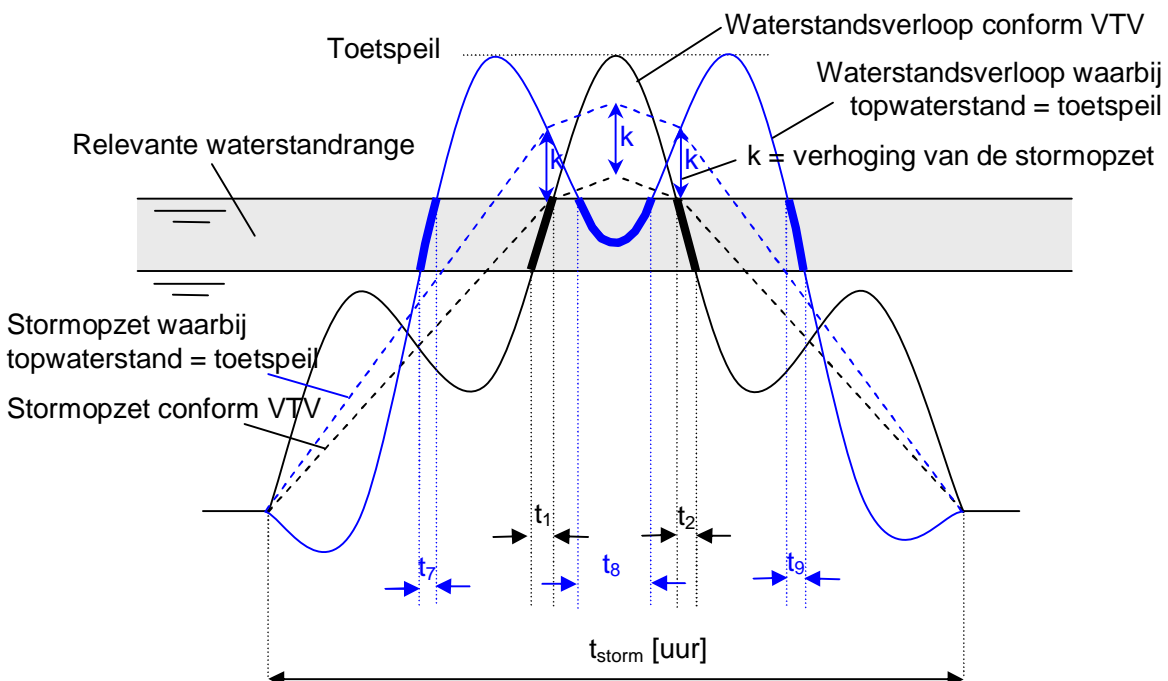
In Figuur 3.1 geldt:  $\text{belastingduur (bij faseverschil)} = t_3 + t_4 + t_5 + t_6$

- Een waterstandsverloop waarbij de maximale topwaterstand gelijk is aan het toetspeil (Figuur 3.2, blauwe lijn):  
In dit geval wordt gesteld dat de maximale waterstand in alle gevallen gelijk is aan het toetspeil. Dat is mogelijk door de hoogte van de stormopzet te variëren. Dit sluit wel aan bij de wijze waarop het toetspeil in het verleden is vastgesteld.

In Figuur 3.2 geldt:  $\text{belastingduur (bij faseverschil)} = t_7 + t_8 + t_9$



Figuur 3.1 Waterstandsverloop (rood) bij faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater, uitgaande van een vaste stormopzet (schematisch).



Figuur 3.2 Waterstandsverloop (blauw) bij faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater, waarbij de topwaterstand gelijk is aan het toetspeil (schematisch).

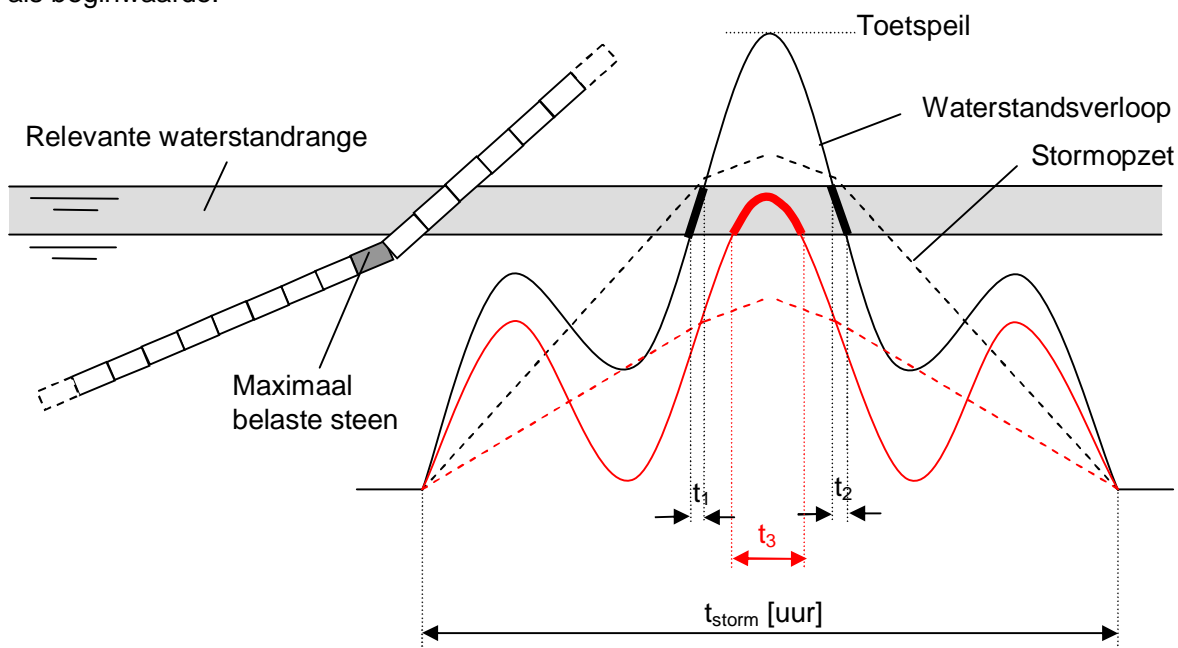
In de situaties van Figuur 3.1 en Figuur 3.2 is de belastingduur bij een faseverschil ( $t_{\text{belast}} = t_3 + t_4 + t_5 + t_6$  en  $t_{\text{belast}} = t_7 + t_8 + t_9$ ) langer dan de belastingduur conform de VTV ( $t_{\text{belast}} = t_1 + t_2$ ). STEENTOETS2008 rekent soms dus met een belastingduur die korter is dan in

werkelijkheid. Het is nauwkeuriger om de stabiliteit niet alleen te berekenen voor de situatie conform de VTV, maar ook voor de situaties waarbij een faseverschil aanwezig is tussen de top van de stormopzet en hoogwater.

Wegens het grote aantal mogelijke faseverschillen zijn zeer veel verschillende waterstandsverlopen mogelijk. Voor elk waterstandsverloop berekent Steentoets de bijbehorende maatgevende waterstand en belastingduur. Daaruit wordt de maatgevende situatie geselecteerd. Dat is een uitgebreid en tijdrovend rekenproces. In deze case wordt voor het waterstandsverloop van Figuur 3.2 onderzocht of er in Steentoets gerekend kan worden met een 'omhullende' belastingduur. Mogelijk vereenvoudigt dat het rekenproces en verkort het de rekentijd.

### 3.2 Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden

In STEENTOETS2008 wordt achtereenvolgens stapsgewijs voor vele waterstanden de toplaagstabiliteit bepaald. In het waterstandverlagingsproces wordt  $h_{\text{toets}}$  als startwaarde genomen en vervolgens wordt stap voor stap een lagere waterstand doorgerekend. Dit wordt gedaan voor elk afzonderlijk steenzettingsegment. Evenals bij hoger gelegen steenzettingen, wordt ook bij lager gelegen steenzettingen het waterstandverlagingsproces gestart met  $h_{\text{toets}}$  als beginwaarde.



Figuur 3.3 Belastingduur, afhankelijk van hoogte van topwaterstand (schematisch).

Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen hoger gelegen steenzettingen en lager gelegen steenzettingen. Kenmerkend voor een hoger gelegen steenzetting is dat deze zwaar belast wordt bij een waterstand gelijk aan het toetspeil. Voor een lager gelegen steenzetting is het toetspeil te hoog om enige belasting van betekenis te geven. De bovenste overgangconstructie van zo'n lager gelegen steenzetting ligt dan zo ver onder water dat de brekende golven alleen belastingen geven op het erboven gelegen stuk steenzetting, en dus tellen deze belastingen niet mee in de toetsing.

Bij lager gelegen steenzettingen zal in sommige gevallen een langere belastingduur gevonden worden, wanneer de topwaterstand van het waterstandsverloop lager is dan

toetspeil. Het gehele waterstandsverloop komt daardoor lager te liggen. Zie Figuur 3.3. In dat voorbeeld hoort bij de lagere steenzetting de volgende belastingduur:

Volgens STEENTOETS2008 (zwarte lijn):	belastingduur = $t_1 + t_2$
In geval van een topwaterstand lager dan $h_{\text{toets}}$ (rode lijn):	belastingduur = $t_3$
In dit voorbeeld geldt:	$t_1 + t_2 < t_3$

STEENTOETS2008 toetst steenzettingen voor het hoogst mogelijke waterstandsverloop, met een topwaterstand ter hoogte van het toetspeil. Voor lager gelegen steenzettingen is dat waterstandsverloop niet altijd maatgevend. Het verdient de voorkeur om lagere steenzettingen eveneens te toetsen voor een waterstandsverloop met lagere topwaterstand.

### 3.3 Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen

Aan het begin van de belastingduurberekening wordt bepaald op welke locatie op het talud het maximale stijghoogteverschil optreedt. Die locatie wordt het zwaarst belast. Het maximale stijghoogteverschil kan optreden op 5 verschillende locaties (zie paragraaf 2.2.2).

In STEENTOETS2008 worden slechts 2 locaties berekend, die maatgevend geacht worden. Bij steenzettingen met een leklengte langer dan 1,5 m en bij ingegoten steenzettingen wordt de locatie berekend aan de voet van het hoge stijghoogtefront. Bij een leklengte korter dan 1,5 m wordt een locatie berekend, die vrijwel in het midden ligt tussen de locaties zeewaarts en landwaarts van golfklap type 1. De overige locaties blijven buiten beschouwing.

Hoewel STEENTOETS2008 de locatie berekent die maatgevend geacht wordt, is het nauwkeuriger alle 5 de locaties te berekenen, en dan te kiezen voor de locatie die uiteindelijk de laagste stabiliteit geeft. Met name bij steenzettingen met een leklengte rond de 1,5 m kan het voorkomen dat STEENTOETS2008 niet de maatgevende locatie beschouwt.

### 3.4 Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd

In STEENTOETS2008 wordt de waterstand stapsgewijs vanaf  $h_{\text{toets}}$  verlaagd. In elke waterstandverlagingsstap wordt de stabiliteit van de steenzetting berekend. In de stabiliteitsberekeningen wordt gedurende de gehele stormduur gerekend met dezelfde golfhoogte.

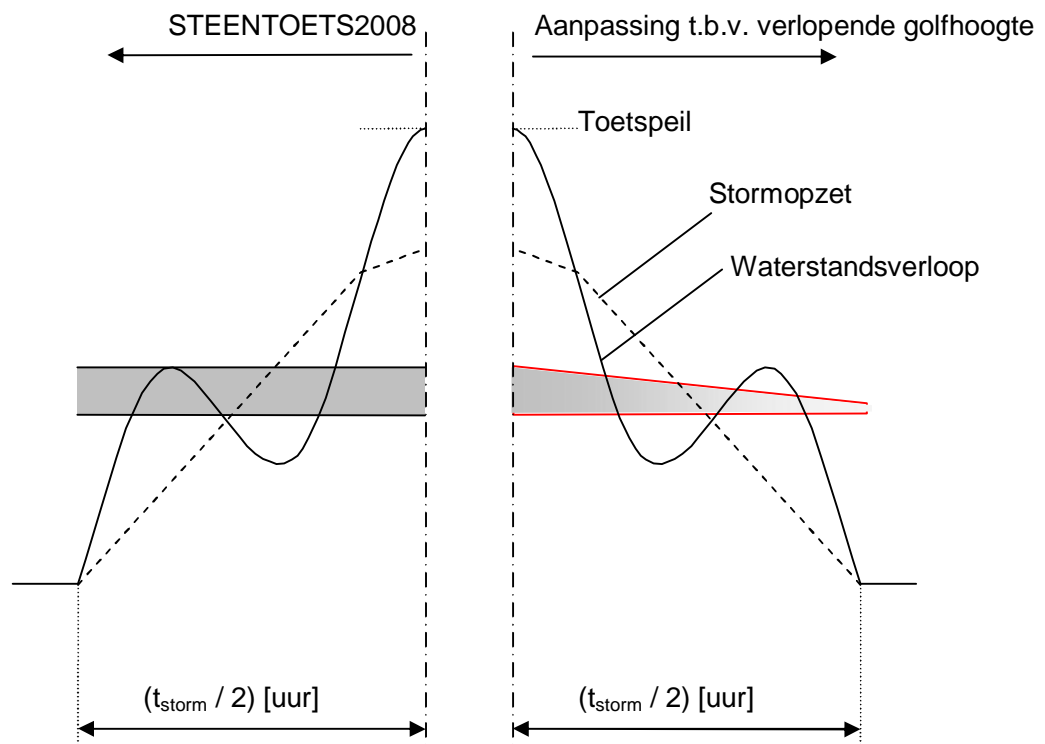
In werkelijkheid zal de golfhoogte variëren gedurende de stormduur. In het midden van de storm zijn de golven hoog, maar aan het begin en einde van de storm is de golfhoogte relatief gering. Het verloop van de golfhoogte heeft invloed op de positie van de relevante waterstandrange. De grenzen van de range worden berekend met de volgende formules:

$$\text{Ondergrens relevante waterstandrange: } h_L = Z_{\text{belast}} + 0,2 \cdot H_s \cdot \min(\xi_{op}; 4)$$

$$\text{Bovengrens relevante waterstandrange: } h_H = Z_{\text{belast}} + 0,6 \cdot H_s \cdot \min(\xi_{op}; 4)$$

Naarmate de golfhoogte kleiner wordt, zal de relevante waterstandrange smaller worden. Dit effect is weergegeven in Figuur 3.4. Het linkerdeel van de figuur geeft de relevante waterstandrange weer, waarmee in STEENTOETS2008 gerekend wordt. Het rechterdeel in de figuur geeft de relevante waterstandrange, waarmee gerekend zal worden wanneer het verloop van de golfhoogte wordt verdisconteerd. In het voorbeeld van Figuur 3.4 zal de totale belastingduur korter zijn, wanneer het verloop van de golfhoogte wordt verdisconteerd.

Daarnaast heeft de verlopende golfhoogte invloed op de grootte van de golfbelasting op steenzettingen. De lage golven aan het begin en het einde van een storm hebben over het algemeen een geringere invloed op de steenzettingstabilditeit dan de hoge golven in het midden van de storm. In Figuur 3.4 is dit weergegeven middels een variërende kleurintensiteit in de relevante waterstandrange.



Figuur 3.4 Invloed van verlopende golfhoogte op positie van waterstandrange (schematisch).

### 3.5 Golfsteilheid verloopt met de tijd

In STEENTOETS2008 wordt per waterstandverlagingsstap gedurende de gehele stormduur gerekend met dezelfde golfsteilheid. In werkelijkheid zal de golfsteilheid bij benadering aan het begin van een storm het grootst zijn en langzaam afnemen tot het einde van de storm.

Doordat de golfsteilheid  $s_{\text{op}}$  in de tijd afneemt, zal de brekerparameter  $\xi_{\text{op}}$  in de tijd toenemen. De relevante waterstandrange zal daardoor vanaf het begin van de storm naar het einde toe steeds wijder worden en in zijn geheel hoger komen te liggen.

Daarnaast heeft een afnemende golfsteilheid invloed op de grootte van de golfbelasting op steenzettingen. De golven aan het begin van een storm, met een hoge golfsteilheid, zijn minder schadelijk voor steenzettingen dan even hoge golven aan het einde van een storm, met een lage golfsteilheid (mits  $\xi_{\text{op}} < 2$ ). Om die reden is het realistischer om tijdsintervallen aan het begin van een storm minder zwaar te laten meetellen dan de tijdsintervallen aan het einde van een storm.

### 3.6 Hoek van golfaanval verloopt met de tijd

In STEENTOETS2008 wordt aangenomen dat golven gedurende de hele storm vanuit dezelfde richting aanvallen op steenzettingen.

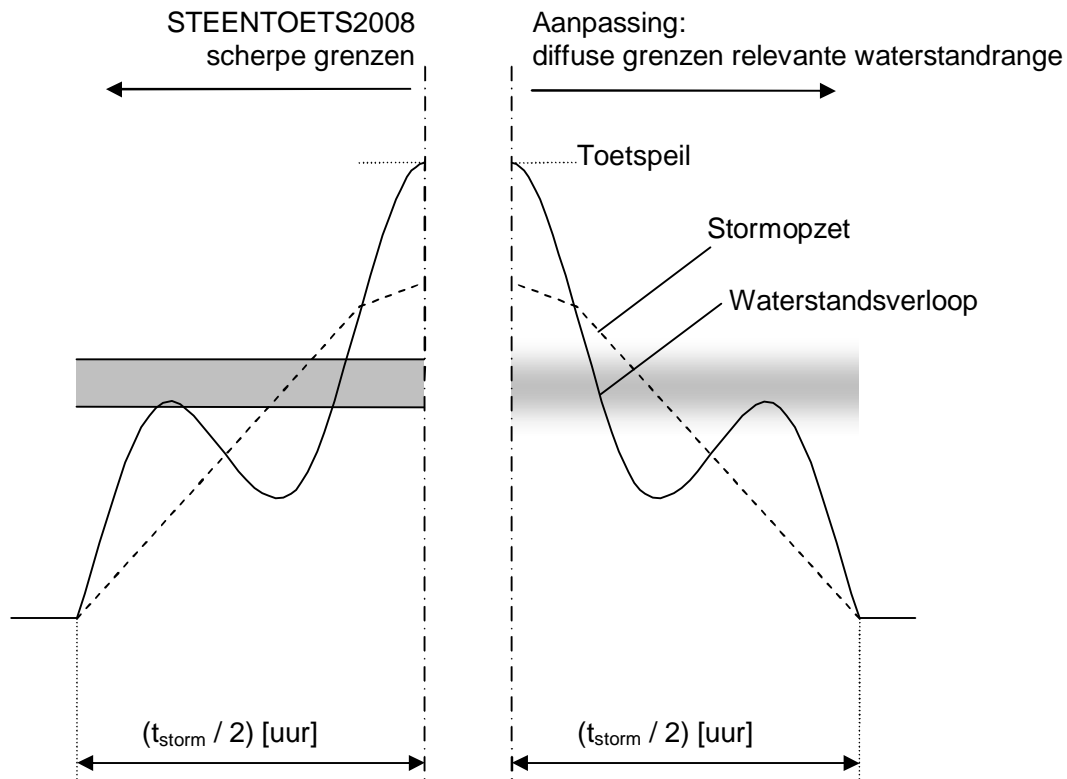
In werkelijkheid zal deze invalshoek veranderen naarmate een storm verstrijkt. Stormen worden veroorzaakt door een snel roterende beweging van lucht om een lage drukgebied. Tevens volgt ook het lage drukgebied zelf een bepaalde baan. Stormen, welke voor Nederland veelal maatgevend zijn, passeren noordelijk van Nederland.

De combinatie van deze baan en de roterende beweging van de lucht veroorzaakt een veranderende windrichting in de loop van de storm. Het is nauwkeuriger deze veranderende hoek van golfaanval in Steentoets te verdisconteren.

### 3.7 Variërende stormduur

In de VTV is voor de verschillende watersystemen in Nederland vastgesteld voor welke stormduur de steenzettingen getoetst moeten worden. Een overzicht van de te gebruiken stormduren is weergegeven in Tabel 2.1. Conform de VTV wordt in STEENTOETS2008 met deze duren gerekend.

Een storm houdt zich in werkelijkheid niet aan voorschriften in de VTV en kan een langere of kortere duur hebben. Het verdient de voorkeur te onderzoeken wat de invloed is van de stormduur op de belastingduur en de steenzettingstabiliteit.



Figuur 3.5 Scherpe en diffuse grenzen van relevante waterstandrange (schematisch).

### 3.8 Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken

In STEENTOETS2008 wordt de belastingduur berekend door de tijdsintervallen te sommeren, waarvoor geldt dat de waterstandsverloopcurve binnen de relevante waterstandrange valt. In STEENTOETS2008 zijn de grenzen van de relevante waterstandrange scherp afgebakend (zie linker deel van Figuur 3.5). Wanneer een top van het waterstandsverloop net binnen de range valt, draagt dat tijdsinterval volledig bij aan de belastingduur. Maar wanneer een top daarentegen net onder de range blijft, telt die in het geheel niet mee.

Wanneer bij twee vrijwel gelijke situaties, de top van het waterstandverloop in het ene geval net wel, en in het andere geval net niet binnen de relevante waterstandrange valt, kan dat sterk verschillende belastingduren opleveren, met verschillende stabiliteitsbeoordelingen tot gevolg. Dit is niet realistisch, aangezien de waterstandrange in werkelijkheid niet zo scherp begrensd is.

Het is realistischer om de grenzen van de relevante waterstandrange diffuus te maken (zie rechter deel van Figuur 3.5). Het deel van de waterstandsverloopcurve, dat in het midden van de range valt, telt volledig mee. Maar naar de grenzen van de waterstandrange toe, zal de bijdrage afnemen.





## 4 Schatting van de invloed van mogelijke aanpassingen

In hoofdstuk 3 zijn diverse mogelijke aanpassingen beschreven, die invloed hebben op de belastingduur en de stabiliteit van steenzettingen. In hoofdstuk 4 wordt voor elke aanpassing geschat hoe groot die invloed is. Deze studie blijft beperkt tot gebieden anders dan de Oosterschelde, de bovenrivieren en de benedenrivieren dg. 3-5.

Het schatten van de invloed op de belastingduur en de stabiliteit wordt voor elke aanpassing afzonderlijk gedaan in cases. Om de invloed te kunnen kwantificeren, is steeds de betreffende aanpassing in STEENTOETS2008 doorgevoerd. Met elke aangepaste versie van Steentoets worden één of meer specifieke realistische steenzettingen doorgerekend: een betonzuilensteenzetting en een blokkensteenzetting. Voor beide steenzettingen zijn in de bijlagen I.1 en I.2 de hydraulische parameters en geometrische eigenschappen gegeven, die in de cases als uitgangspunt worden genomen. Afhankelijk van de aard van de case worden daarvan soms waarden gevarieerd. De variaties worden per case toegelicht in de tekst. De gebruikte hydraulische parameters en geometrische eigenschappen zijn representatief voor de meest voorkomende steenzettingen in Nederland. Het grootste deel van de Nederlandse steenzettingen wordt daardoor in dit onderzoek beschouwd.

De uitkomsten van die cases worden vergeleken met de uitkomsten van STEENTOETS2008.

Als een andere steenzetting of belastingscenario wordt gekozen, zullen de uitkomsten van de berekeningen wat anders zijn. Het is zelfs niet uit te sluiten dat in sommige gevallen de conclusies wat anders uitpakken. Door gebruik te maken van twee uiteenlopende type steenzettingen, waarbij de zuilen tegenwoordig veel worden toegepast in de renovatieprojecten, is getracht het hele scala aan steenzettingen af te dekken. Grote verschillen tussen resultaten met deze twee typen steenzettingen zijn een indicatie van de afhankelijkheid van de gekozen geometrieparameters. Waar relevant, wordt dit in dit hoofdstuk nader belicht.

Voor de hydraulische belasting is gebruikgemaakt van een veelvoorkomende golfsteilheid van  $H_s/(1,56T_p^2) = 0,023$ . Deze waarde is vrij normaal langs de Westerschelde en Waddenzee, maar wat aan de lage kant voor de Oosterschelde. De golfhoogte bij toetspeil is gekozen op  $H_s = 1,75$  m, hetgeen overeenkomt met het hart van de range van meest voorkomende golfcondities bij het toetspeil in Nederland, namelijk  $1 < H_s < 2,5$  m, met de kanttekening dat het aantal locaties met  $H_s > 1,75$  m groter is dan met  $H_s < 1,75$  m.

Daarnaast is de keuze voor de mate waarin de golfhoogte afneemt met afnemende waterstand relevant voor de resultaten. Als de waterstand 2 m afneemt, is de golfhoogte 0,5 m gereduceerd met gelijkblijvende golfsteilheid. Deze afname is ongeveer een gemiddelde waarde voor Nederland, die echter wat groter is dan langs de Oosterschelde.

In dit hoofdstuk en in navolgende hoofdstukken wordt regelmatig verwezen naar verschillende versies van Steentoets. Onderstaand wordt een overzicht gegeven van de gebruikte versieaanduidingen:

- STEENTOETS2008: originele versie van STEENTOETS2008, versie 1.01.
- Steentoets2008.a.1: aangepast t.b.v. 'case a.1: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater' (Waterstandsverloop uitgaande van vaste stormopzet).
- Steentoets2008.a.2: aangepast t.b.v. 'case a.2: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater' (Waterstandsverloop waarbij hoogste waterstand gelijk is aan toetspeil).
- Steentoets2008.a.3: aangepast t.b.v. 'case a.3: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater' (Omhullende belastingduur).

- Steentoets2008.b: aangepast t.b.v. 'Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden'.
- Steentoets2008.c: aangepast t.b.v. 'Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen'.
- Steentoets2008.d: aangepast t.b.v. 'Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd'.
- Steentoets2008.e: aangepast t.b.v. 'Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd'.
- Steentoets2008.f: aangepast t.b.v. 'Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd'.
- Steentoets2008.g: aangepast t.b.v. 'Case g: Variërende stormduur'.
- Steentoets2008.h: aangepast t.b.v. 'Case h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken'.

In de genoemde versies van Steentoets wordt in alle gevallen gerekend met eventuele klemming en zonder bovengrens van de stabiliteit. Dat voorkomt dat de tussen- en eindresultaten van Steentoets worden beïnvloed als gevolg van eventuele neveneffecten. Daardoor zijn de resultaten beter interpreteerbaar.

#### 4.1 Case a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater

##### 4.1.1 STEENTOETS2008

Voor gebieden, anders dan de Oosterschelde, de bovenrivieren en de benedenrivieren dg. 3-5, wordt in STEENTOETS2008 conform de VTV aangenomen dat de top van de stormopzet gelijk valt met hoogwater (Figuur 3.1). Daardoor geldt dat het waterstandsverloop symmetrisch is ten opzichte van het moment  $t = 0$ , het moment waarop het toetspeil bereikt wordt.

Het symmetrische waterstandsverloop voor de gebieden, anders dan de Oosterschelde, de bovenrivieren en de benedenrivieren dg. 3-5, wordt in STEENTOETS2008 berekend met de onderstaande 2 formules:

Als  $0 \leq t \leq 2$  uur:

$$h = h_{toets} + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos\left(\frac{2\pi t}{12,25}\right) - 1 \right) - 0,05 \cdot t$$

Als  $2 < t \leq t_{storm}/2$  uur:

$$h = h_{toets} - 0,1 + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos\left(\frac{2\pi t}{12,25}\right) - 1 \right) - \frac{h_{toets} - 0,1 - R_{ij}/2}{(t_{storm} - 4)/2} \cdot (t - 2)$$

##### 4.1.2 Mogelijke aanpassingen

In werkelijkheid zal de top van de stormopzet niet altijd samenvallen met hoogwater. Het tijdsverschil tussen de top van de stormopzet en hoogwater wordt in dit rapport aangeduid als het 'faseverschil'. Wanneer er een faseverschil aanwezig is, is het waterstandsverloop niet meer per definitie symmetrisch ten opzichte van het moment  $t = 0$ . Het waterstandsverloop kan daardoor niet meer worden berekend met de 2 formules uit paragraaf 4.1.1. Er zijn aangepaste formules nodig.

Uitgaande van de basisformules, die in STEENTOETS2008 worden gebruikt, kunnen twee verschillende typen waterstandsverlopen berekend worden. Beide typen worden onderzocht in subcases:

- **Case a.1:** Een waterstandsverloop uitgaande van een vaste stormopzet en een variabele maximale waterstand (zie Figuur 3.1).
- **Case a.2:** Een waterstandsverloop waarbij de maximale waterstand gelijk is aan het toetspeil. De stormopzet is variabel (zie Figuur 3.2).

Wegens het grote aantal faseverschillen, kunnen zeer veel waterstandsverlopen berekend worden. Voor elk waterstandsverloop berekent Steentoets de bijbehorende maatgevende waterstand en belastingduur. Uit al die mogelijkheden wordt de maatgevende situatie geselecteerd. Dat is een uitgebreid en tijdrovend rekenproces.

In **case a.3** wordt een aangepast rekenproces onderzocht, dat mogelijk de rekentijd verkort en de rekenstructuur van Steentoets vereenvoudigt. In case a.3 wordt voor een range faseverschillen onderzocht wat de maximaal optredende belastingduur is, als functie van  $Z_{\text{belast}}$  (het niveau van de maximale belasting op het talud). De maximale belasting wordt aangeduid als de 'omhullende belastingduur'. De omhullende belastingduur wordt beschreven met formules, die ten behoeve van deze case in Steentoets geïmplementeerd worden.

#### 4.1.3 Case a.1: Waterstandsverloop uitgaande van vaste stormopzet

##### 4.1.3.1 Aanpassing

Het waterstandsverloop voor het tijdinterval  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur wordt in Steentoets2008.a.1 berekend met de onderstaande 4 formules.

Als  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t < -2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} - 0,1 + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(-t + t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - \frac{h_{\text{toets}} - 0,1 - R_{ij} / 2}{(t_{\text{storm}} - 4) / 2} \cdot (-t - 2)$$

Als  $-2 \leq t < 0$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(-t + t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - 0,05 \cdot (-t)$$

Als  $0 \leq t < 2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(t - t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - 0,05 \cdot t$$

Als  $2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} - 0,1 + \frac{R_{ij}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(t - t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - \frac{h_{\text{toets}} - 0,1 - R_{ij} / 2}{(t_{\text{storm}} - 4) / 2} \cdot (t - 2)$$

In de formules is de factor  $t_{\text{fase}}$  opgenomen.

$t_{\text{fase}}$  = faseverschil tussen hoogwater en moment van maximale stormopzet [uur].

Er geldt:  $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 6,125$  uur.

Merk op dat een halve getijdenperiode in werkelijkheid 6,208 uur duurt in plaats van 6,125 uur. In STEENTOETS2008 wordt echter abusievelijk gerekend met een getijdenperiode van 12,25 uur. Om daar niet van af te wijken, wordt in dit rapport gerekend met een halve getijdenperiode van  $12,25/2 = 6,125$  uur. Dit heeft geen invloed op de conclusies van dit onderzoek. Begin 2011 is deze fout in Steentoets hersteld.

Door het faseverschil te variëren tussen 0 en 6,125 uur kunnen alle mogelijke waterstandsverlopen binnen het tijdinterval  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur doorgerekend worden. Als  $t_{\text{fase}} = 0$  uur, dan valt hoogwater samen met de top van de stormopzet. Door het invoeren van  $t_{\text{fase}} = 6,125$  uur wordt de getijdensinusoïde een halve getijdenperiode verschoven. Merk op dat als  $t_{\text{fase}} \neq 0$  uur de hoogste waterstand lager is dan het toetspeil.

De belastingduur wordt vervolgens bepaald door voor bovenstaande formules te bepalen hoe lang in totaal voldaan wordt aan het volgende criterium, gedurende  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur:

$h_L < h < h_H$ , waarin:

- $h_H$  = bovengrens van de relevante waterstandrange [m, NAP+]
- $h$  = hoogte van het waterstandsverloop, behorend bij  $h_{\text{toets}}$  [m, NAP+]
- $h_L$  = ondergrens van de relevante waterstandrange [m, NAP+]

Daarnaast zijn in Steentoets2008.a.1 aanpassingen gedaan in de tijdstapgrootte waarmee gerekend wordt. In STEENTOETS2008 wordt per stapgrootte van 1 uur bepaald hoe lang aan het criterium  $h_L < h < h_H$  wordt voldaan. Vanwege het symmetrische waterstandsverloop in STEENTOETS2008 wordt gestart bij  $t = 0$  en wordt het rekenproces geëindigd bij het eerste gehele uur waarvoor geldt  $t \geq t_{\text{storm}}/2$  uur. De resultaten worden uiteindelijk verdubbeld. Bij een asymmetrisch waterstandsverloop in Steentoets2008.a.1 moet het rekenproces beginnen bij  $t = -t_{\text{storm}}/2$  uur en doorlopen tot  $t = t_{\text{storm}}/2$  uur. Om de rekentijd van Steentoets2008.a.1 te beperken, wordt ook hier een standaard stapgrootte van 1 uur aangehouden. Zonder verdere aanpassingen in Steentoets2008.a.1 zal het criterium bij een oneven stormduur van bijvoorbeeld 35 uur echter bepaald worden voor de tijdstippen  $t = -17,5$ ,  $t = -16,5$ ,  $t = -15,5$  tot  $t = 16,5$  en  $t = 17,5$ . Dit geeft een enigszins verschoven beeld ten opzichte van STEENTOETS2008, als gevolg van afrondingen en andere interpolaties. Om die reden zal in Steentoets2008.a.1 het eerste en het laatste tijdstapje een half uur duren. Het criterium wordt daardoor in overeenstemming met STEENTOETS2008 bepaald op de tijdstippen  $t = -17,5$ ;  $t = -17$ ;  $t = -16$  tot  $t = 16$ ,  $t = 17$  en  $t = 17,5$

#### 4.1.3.2 Werkwijze

De grootte van de invloed, van een variërend faseverschil op de belastingduur en de stabiliteit van steenzettingen, is geschat aan de hand van case a.1. Ten behoeve van de case zijn in Steentoets2008.a.1 de formules uit paragraaf 4.1.1 vervangen door de formules uit paragraaf 4.1.3.1. De aanpassing wordt doorgerekend voor een betonzuilensteenzetting. Voor de steenzetting zijn de maatgevende waterstand  $h_{\text{MWS}}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{\text{belast}}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{\text{gt}}$  [-] bepaald voor  $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 6$  uur (met een stapgrootte van 1 uur). Dit is gedaan voor vier verschillende getijdenranges.

## 4.1.3.3 Resultaten

Tabel 4.1 geeft de belangrijkste resultaten van case a.1. In de tabel is voor de steenzetting per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ . Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de waarden die worden berekend in STEENTOETS2008 (ST.2008) en tussen de minimale en maximale waarden die worden berekend in Steentoets2008.a.1 (in de tabel aangeduid als St.2008.a.1).

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.a.1 (voor $0 \leq t_{fase} \leq 6$ uur)										
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]			$t_{belast}$ [uur]			$f_{gt}$ [-]		
		ST.2008		St.2008.a.1	ST.2008		St.2008.a.1	ST.2008		St.2008.a.1
			min	max		min	max		min	max
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	4.75	3.85	4.75	4.1	3.9	10.9	2.57	2.57	3.17
	-1,00 tot 1,00	4.60	3.65	4.70	3.6	3.0	8.5	2.97	2.97	3.88
	-1,50 tot 1,50	5.00	3.65	5.00	1.8	1.8	6.4	3.03	3.03	4.16
	-2,00 tot 2,00	5.00	3.65	5.00	1.8	1.8	5.7	3.03	3.03	4.37

Tabel 4.1 Resultaten 'Case a.1: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.

Bijlage A.1 geeft het volledige overzicht van de resultaten. De ononderbroken lijnen geven de resultaten van Steentoets2008.a.1. De stippellijnen geven de resultaten van STEENTOETS2008. De stippellijnen zijn constant doordat STEENTOETS2008 in alle gevallen rekent met een faseverschil van 0 uur.

Bij faseverschillen van 0 tot 2 uur zijn nauwelijks verschillen zichtbaar tussen Steentoets2008.a.1 en STEENTOETS2008. Bij faseverschillen van 3 tot 6 uur neemt de belastingduur in Steentoets2008.a.1 sterk toe, doordat meerdere toppen en/of dalen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange vallen. De maatgevende waterstand neemt in die gevallen af.

De stabiliteit van de steenzetting is in Steentoets2008.a.1 in alle gevallen hoger dan in STEENTOETS2008, maar door 2 tegengestelde invloeden is het verschil beperkt:

- een hogere  $t_{belast}$  geeft lagere  $f_{gt}$ .
- een lagere  $h_{MWS}$  geeft lagere  $H_s$  en dus hogere  $f_{gt}$ .

De stabiliteit is voor alle getijdenranges het laagst bij een faseverschil van 0 uur. Dat is het faseverschil waarmee STEENTOETS2008 rekent. STEENTOETS2008 geeft dus de maatgevende waarden.

Het maximale verschil in de  $f_{gt}$ -waarde is het kleinst bij een kleine getijdenrange en het grootst bij een grote getijdenrange. Het maximale verschil bij een kleine getijdenrange is circa 0,5 terwijl dat bij een grote getijdenrange circa 1,4 is.

De invloed van deze aanpassing op de stabiliteit is vooral afhankelijk van de snelheid waarmee  $H_s$  en  $T_p$  afnemen als functie van de waterstand. Zie bijlagen I.1 en I.2 voor het verloop van  $H_s$  en  $T_p$  waarmee gerekend is. Er is gekozen voor een voor Nederland ongeveer gemiddelde afnamesnelheid (de golfhoogte neemt 0,5 m af als de waterstand 2 m afneemt, bij gelijkblijvende golfsteiheid).

Als er bijvoorbeeld geen afname van de golfhoogte optreedt bij het afnemen van de waterstand, dan zal alleen de belastingduur toenemen zonder dat de golfhoogte afneemt bij het veranderen van het faseverschil. Daardoor zal de stabiliteit afnemen bij een faseverschil anders dan 0 uur. Het niet dalen van de golfhoogte bij dalende waterstand is echter zeldzaam in Nederland

#### 4.1.4 Case a.2: Waterstandsverloop waarbij hoogste waterstand gelijk is aan toetspeil

##### 4.1.4.1 Aanpassing

In case a.2 worden bij benadering dezelfde aanpassingen gedaan als in case a.1. Het enige verschil is de toevoeging van een factor  $k$  in de formules voor het waterstandsverloop  $h$ . Deze factor  $k$  zorgt ervoor dat de stormopzet zodanig verhoogd wordt, dat:

- de hoogste top van het waterstandsverloop gelijk is aan het toetspeil.
- de richtingscoëfficiënten van de middelste 4 uren van de stormopzet gelijk blijven.

Factor  $k$  wordt gegeven door de onderstaande formules:

Als  $-2 \leq t_{\max} \leq 2$  uur:

$$k = h_{\text{toets}} - h_{\max}$$

Als  $t_{\max} < -2$  uur en als  $t_{\max} > 2$  uur:

$$k = (h_{\text{toets}} - h_{\max}) \cdot \frac{t_{\text{storm}} / 2 - 2}{t_{\text{storm}} / 2 - |t_{\max}|}$$

Daarin is:

$h_{\max}$  = maximale hoogte van het waterstandsverloop van case a.1, afhankelijk van het faseverschil [m, NAP+].

$t_{\max}$  = tijdstip behorende bij  $h_{\max}$  [uur].

Het waterstandsverloop voor het tijdinterval  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur wordt in Steentoets2008.a.2 berekend met de onderstaande 4 formules.

Als  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t < -2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} - 0,1 + \frac{R_{\text{tij}}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(-t + t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - \frac{h_{\text{toets}} - 0,1 - R_{\text{tij}} / 2 + k}{(t_{\text{storm}} - 4) / 2} \cdot (-t - 2) + k$$

Als  $-2 \leq t < 0$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} + \frac{R_{\text{tij}}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(-t + t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - 0,05 \cdot (-t) + k$$

Als  $0 \leq t < 2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} + \frac{R_{\text{tij}}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(t - t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - 0,05 \cdot t + k$$

Als  $2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur:

$$h = h_{\text{toets}} - 0,1 + \frac{R_{\text{rij}}}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi(t - t_{\text{fase}})}{12,25} \right) - 1 \right) - \frac{h_{\text{toets}} - 0,1 - R_{\text{rij}}/2 + k}{(t_{\text{storm}} - 4)/2} \cdot (t - 2) + k$$

#### 4.1.4.2 Werkwijze

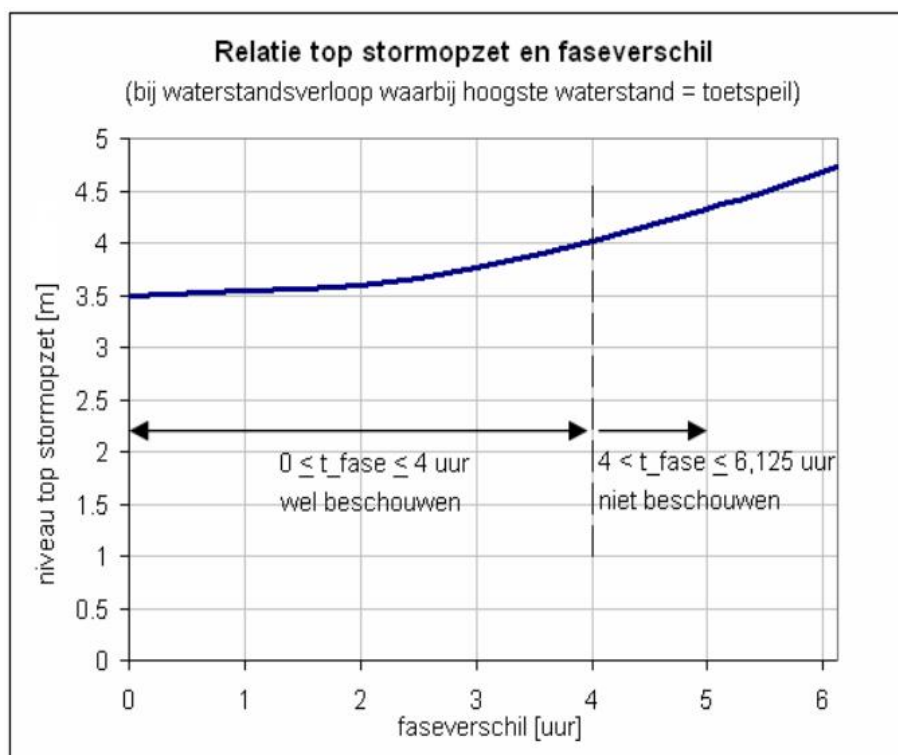
In case a.2 wordt dezelfde werkwijze gehanteerd als in case a.1, uitgaande van de formules van paragraaf 4.1.4.1.

#### 4.1.4.3 Resultaten

Tabel 4.2 geeft de belangrijkste resultaten van case a.2. In de tabel is voor de steenzetting per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$ . Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de waarden die worden berekend in STEENTOETS2008 (ST.2008) en tussen de minimale en maximale waarden die worden berekend in Steentoets2008.a.2 (in de tabel aangeduid als St.2008.a.2).

In Figuur 4.1 is de situatie beschouwd waarin het toetspeil NAP+5,0m is en de getijdenrange 3,0m (van stormopzet -1,5m tot stormopzet +1,5m). Bij een faseverschil van 0 uur, is er een stormopzet van (toetspeil - halve getijdenrange = 5,0 - 1,5) = 3,5m. Dit is conform de huidige VTV/HR.

Wanneer het toetspeil als vaste waarde wordt beschouwd, zal de stormopzet groter moeten worden naarmate het faseverschil toeneemt (zie Figuur 3.2). Bij een faseverschil van 6,125 uur hoort dan een stormopzet van 4,73m. Dan valt laagwater samen met het hoogtepunt van de stormopzet, en wordt het toetspeil een paar uur ervoor en erna tweemaal bereikt.



Figuur 4.1

Relatie top stormopzet en faseverschil.

( $h_{\text{toets}} = \text{NAP}+5,0\text{m}$ ;  $R_{\text{rij}} = 3,0\text{m}$  en waterstandsverloop waarbij hoogste waterstand = toetspeil)

Een grote stormopzet komt minder vaak voor dan een kleine stormopzet. Wanneer met een hogere stormopzet gerekend wordt, wordt dus indirect gerekend met een situatie die minder vaak voorkomt, dan waarop dijken momenteel getoetst dienen te worden. In feite wordt dan dus gerekend met een strengere normfrequentie. Bij faseverschillen groter dan 4 uur wordt de stormopzet zo onrealistisch groot, dat die faseverschillen hier buiten beschouwing gelaten worden.

In de tabel worden daarom uitsluitend de resultaten gegeven, behorende bij  $0 < t_{\text{fase}} < 4$ .

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.a.2 (voor $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 4$ uur)										
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	$h_{\text{MWS}}$ [m, NAP+]			$t_{\text{belast}}$ [uur]			$f_{\text{gt}}$ [-]		
		ST.2008	St.2008.a.2		ST.2008	St.2008.a.2		ST.2008	St.2008.a.2	
			min	max		min	max		min	max
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	4,75	4,35	4,75	4,1	3,9	7,0	2,57	2,57	2,72
	-1,00 tot 1,00	4,60	4,60	5,00	3,6	1,8	3,6	2,97	2,88	3,03
	-1,50 tot 1,50	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	1,8	3,03	3,03	3,03
	-2,00 tot 2,00	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	1,8	3,03	3,03	3,03

Tabel 4.2 Resultaten 'Case a.2: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.

Bijlage A.2 geeft het volledige overzicht van de resultaten. De ononderbroken lijnen geven de resultaten van Steentoets2008.a.2. De stippellijnen geven de resultaten van STEENTOETS2008. De stippellijnen zijn constant doordat STEENTOETS2008 in alle gevallen rekent met een faseverschil van 0 uur.

Bij een faseverschil van 0 tot 3 uur zijn bij de meeste getijdenranges nauwelijks verschillen zichtbaar tussen Steentoets2008.a.2 en STEENTOETS2008. Bij faseverschillen van 4 tot 6 uur neemt de belastingduur in Steentoets2008.a.2 sterk toe, doordat meerdere toppen en/of dalen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange vallen. De maatgevende waterstand neemt in die gevallen af.

De stabiliteit van de steenzetting is voor faseverschillen van 0 tot 4 uur in Steentoets2008.a.2 vrijwel hetzelfde als in STEENTOETS2008. Bij faseverschillen van 5 tot 6 uur is de stabiliteit in Steentoets2008.a.2 iets lager dan in STEENTOETS2008. De verschillen zijn echter gering door 2 tegengestelde invloeden:

- een hogere  $t_{\text{belast}}$  geeft lagere  $f_{\text{gt}}$ .
- een lagere  $h_{\text{MWS}}$  geeft lagere  $H_s$  en dus hogere  $f_{\text{gt}}$ .

Het maximale verschil in de  $f_{\text{gt}}$ -waarde is over het algemeen het kleinst bij een grote getijdenrange en het grootst bij een kleine getijdenrange. Het maximale verschil bij een grote getijdenrange is circa 0,6 terwijl dat bij een kleine getijdenrange circa 1,0 is. Binnen het relevante gebied ( $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 4$ ) verandert de stabiliteit nauwelijks.

De invloed van deze aanpassing op de stabiliteit is vooral afhankelijk van de snelheid waarmee  $H_s$  en  $T_p$  afnemen als functie van de waterstand. Zie bijlagen I.1 en I.2 voor het verloop van  $H_s$  en  $T_p$  waarmee gerekend is. Er is gekozen voor een voor Nederland ongeveer gemiddelde afnamesnelheid (de golfhoogte neemt 0,5 m af als de waterstand 2 m afneemt, bij gelijkblijvende golfsteiheid).



#### 4.1.5 Case a.3: Omhullende belastingduur

##### 4.1.5.1 Aanpassing

In het rekenproces van Steentoets2008.a.1 en Steentoets2008.a.2 wordt de belastingduur voor elke waterstandstap (en dus voor vele niveaus op het talud) berekend voor de gehele range faseverschillen. Per niveau wordt daaruit de maximale belastingduur geselecteerd. Dat is een lang en gecompliceerd rekenproces, dat wellicht vereenvoudigd kan worden.

In case a.3 wordt voor een range niveaus op het talud voor elk faseverschil onderzocht wat de maximale belastingduur is. De grafieken met die maximale belastingduren worden vervolgens vertaald naar een vereenvoudigde en geschematiseerde 'omhullende belastingduur', waarvan de formules in Steentoets2008.a.3 geïmplementeerd worden. In plaats van in elke waterstandstap voor talloze situaties de belastingduur te berekenen en daaruit de maximale te kiezen, kiest Steentoets2008.a.3 op basis van enkele eenvoudige criteria in de omhullende belastingduurgrafiek met welke duur gerekend moet worden. In het rekenproces wordt daardoor in elke waterstandstap automatisch gerekend met een benadering van de maximale belastingduur.

Bij het bepalen van de omhullende belastingduur wordt uitgegaan van het type waterstandsverloop waarbij de hoogste waterstand gelijk is aan het toetspeil (zoals gebruikt in case a.2; zie Figuur 3.2). De resultaten van case a.3 zullen daarom vergeleken worden met de resultaten van case a.2.

De basis voor deze case werd gelegd in Van der Sande (2010). Daarin wordt een omhullende belastingduur bepaald op basis van de waterstandsgegevens van Vlissingen.

Voor diverse waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$  ( $H_s \cdot \xi_{op} = 0; 0,1; 1; 2; 4; 8$  en  $16$ ) wordt per  $Z_{belast}$  (niveau van de maximale belasting op het talud) voor alle faseverschillen de maximale belastingduur berekend. De maximale belastingduren worden in Figuur 4.2 gegeven als functie van  $Z_{belast}$ , voor diverse waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$ . Bij het genereren van Figuur 4.2 zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

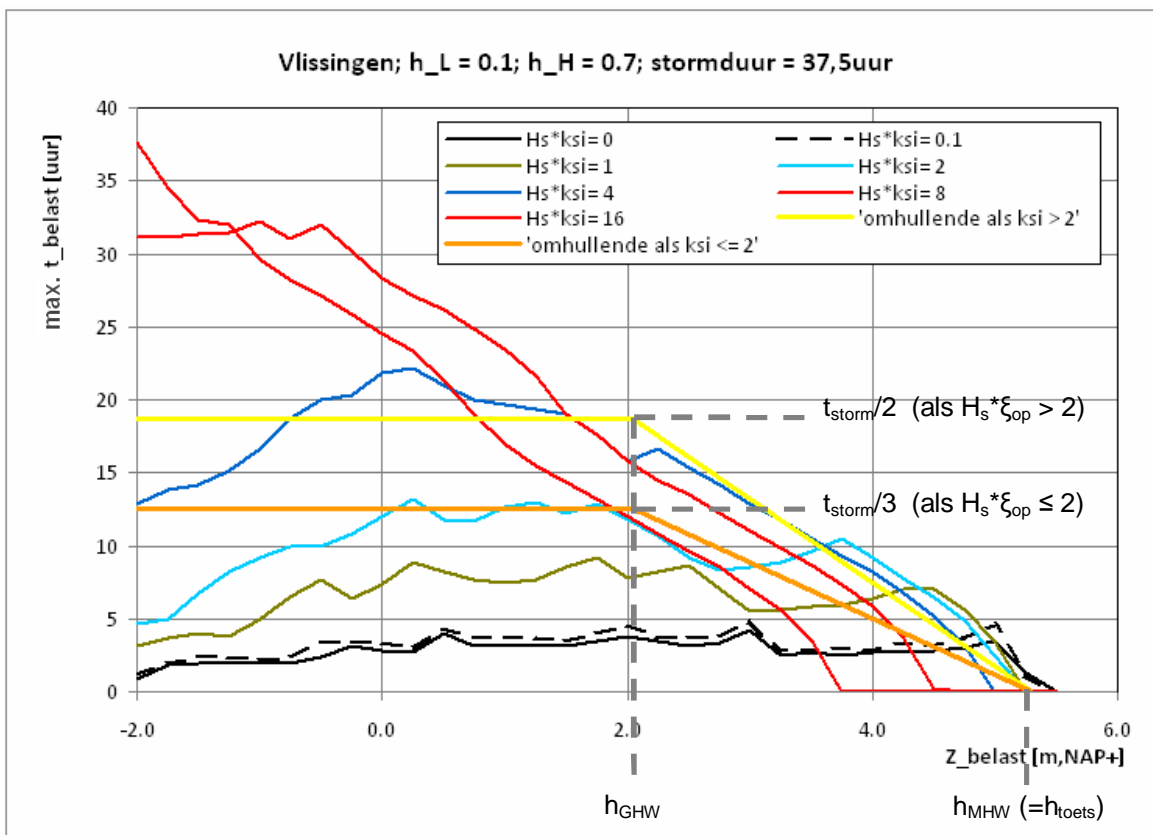
- locatie: Vlissingen
- ondergrens van relevante waterstandrange:  $h_L = 0,1 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$
- bovengrens van relevante waterstandrange:  $h_H = 0,7 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$
- stormduur = 37,5 uur

Als  $Z_{belast} \leq h_{GHW}$ , dan wordt de omhullende belastingduur geschematiseerd als een constante belastingduur:

- $t_{belast} = t_{storm}/2$  als  $H_s \cdot \xi_{op} > 2$  (gele lijn)
- $t_{belast} = t_{storm}/3$  als  $H_s \cdot \xi_{op} \leq 2$  (oranje lijn)

Als  $Z_{belast} > h_{GHW}$ , dan nemen de omhullenden langzaam af tot  $t_{belast} = 0$  uur bij  $Z_{belast} = h_{toets}$ .

Merk op dat de grafiek gemaakt is voor een specifieke locatie en dus niet per definitie generiek gebruikt kan worden.



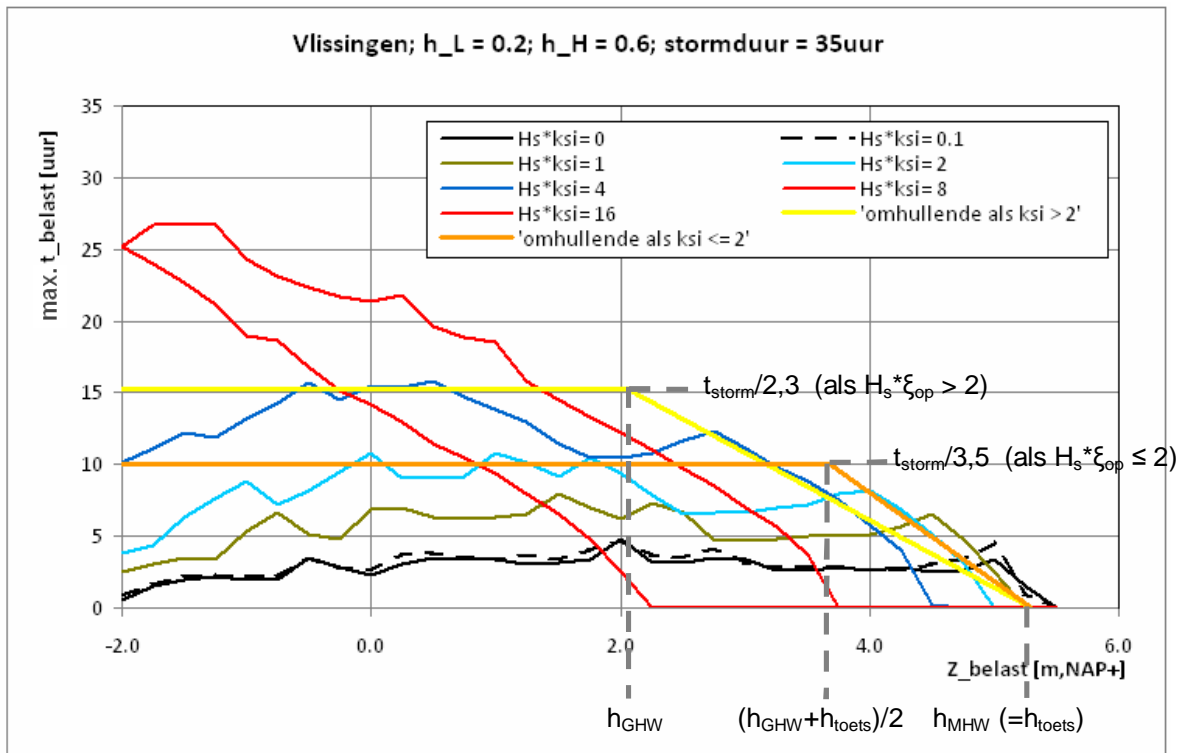
Figuur 4.2 Grafiek 'omhullende belastingduur' uit Van der Sande(2010),  
 Uitgangspunten: locatie = Vlissingen;  $h_L = 0,1$ ;  $h_H = 0,7$ ;  $t_{storm} = 37,5$  uur

In Van der Sande (2010) wordt gerekend met  $h_L = 0,1 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$ ;  $h_H = 0,7 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$  en een stormduur van 37,5 uur. Dat is anders dan in dit rapport.

De grafiek (Figuur 4.2) met de omhullende belastingduur uit Van der Sande (2010) kan daarom niet direct voor case a.3 gebruikt worden. Naar analogie van de gebruikte methode uit Van der Sande (2010) is een nieuwe grafiek gemaakt (zie Figuur 4.3), gebaseerd op de onderstaande uitgangspunten:

- locatie: Vlissingen
- ondergrens van relevante waterstandrange:  $h_L = 0,2 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$
- bovengrens van relevante waterstandrange:  $h_H = 0,6 \cdot H_s \cdot \xi_{op}$
- stormduur = 35 uur

Vanwege het gebruik van andere uitgangspunten, liggen de geplote lijnen van de maximale belastingduren in Figuur 4.3 anders dan in Figuur 4.2. De lijnen van de omhullende belastingduur zijn om die reden aangepast aan de nieuwe resultaten. Er wordt onderscheid gemaakt tussen situaties waarin  $H_s \cdot \xi_{op} > 2$  en waarin  $H_s \cdot \xi_{op} \leq 2$ . De overgangen van horizontale naar diagonale omhullende lijnen liggen niet alleen lager, maar de overgang ligt voor  $H_s \cdot \xi_{op} \leq 2$  ook verder naar rechts: bij  $(h_{GHW} + h_{toets})/2$  in plaats van bij  $h_{GHW}$ .



Figuur 4.3 Grafiek 'omhullende belastingduur' t.b.v. case a.3,   
 Uitgangspunten: locatie = Vlissingen;  $h_L = 0,2$ ;  $h_H = 0,6$ ;  $t_{storm} = 35$  uur)

De omhullende belastingduur uit Figuur 4.3 wordt in Steentoets2008.a.3 beschreven met de onderstaande formules. Er wordt onderscheid gemaakt tussen situaties waarin  $H_s \cdot \xi_{op} > 2$  en  $H_s \cdot \xi_{op} \leq 2$ .

Wanneer  $H_s \cdot \xi_{op} > 2$ , dan wordt gerekend met de volgende formules voor  $t_{belast}$ :

Als  $Z_{belast} \leq h_{GHW}$  : 
$$t_{belast} = \frac{t_{storm}}{2,3}$$

Als  $h_{GHW} < Z_{belast} \leq h_{toets}$  : 
$$t_{belast} = \frac{t_{storm}}{2,3} \left\{ 1 - \frac{Z_{belast} - h_{GHW}}{h_{toets} - h_{GHW}} \right\}$$

Als  $Z_{belast} > h_{toets}$  : 
$$t_{belast} = 0$$

Wanneer  $H_s \cdot \xi_{op} \leq 2$ , dan wordt gerekend met de volgende formules voor  $t_{belast}$ :

Als  $Z_{belast} \leq \frac{h_{GHW} + h_{toets}}{2}$  : 
$$t_{belast} = \frac{t_{storm}}{3,5}$$

Als  $\frac{h_{GHW} + h_{toets}}{2} < Z_{belast} \leq h_{toets}$  : 
$$t_{belast} = \frac{t_{storm}}{3,5} \left\{ 1 - \frac{Z_{belast} - \frac{h_{GHW} + h_{toets}}{2}}{h_{toets} - \frac{h_{GHW} + h_{toets}}{2}} \right\}$$

Als  $Z_{belast} > h_{toets}$  : 
$$t_{belast} = 0$$

#### 4.1.5.2 Werkwijze

In Steentoets2008.a.3 wordt de originele rekenmethode, voor het bepalen van de belastingduur, vervangen door de formules uit paragraaf 4.1.5.1. Met die formules wordt op basis van  $H_s \cdot \xi_{op}$  en  $Z_{belast}$  de bijbehorende belastingduur bepaald.

In case a.3 worden de resultaten van Steentoets2008.a.3 vergeleken met de resultaten van Steentoets2008.a.2. In deze case wordt gerekend met een betonzuilensteenzetting. Voor de steenzetting zijn de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{belast}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$  [-] bepaald voor  $0 \leq t_{fase} \leq 6$  uur (met een stapgrootte van 1 uur). Dit is gedaan voor vier verschillende getijdenranges.

De steenzetting wordt in case a.3 vier keer doorgerekend, voor verschillende waarden van  $H_s \cdot \xi_{op}$ . Daarvoor worden de golfcondities gevarieerd in het tabblad 'Toetsgolven' van Steentoets. In het tabblad 'Toetsing' kan vervolgens afgelezen worden met welke golfcondities door Steentoets2008.a.3 in de maatgevende situatie werd gerekend (zie Tabel 4.3). Om case a.3 met case a.2 te kunnen vergelijken, werd met deze golfcondities ook case a.2 nogmaals doorgerekend.

Geval	$H_s$ [m]	$\xi_{op}$ [-]	$T_p$ [s]	$\sigma_{op}$ [-]	$H_s \cdot \xi_{op}$ [m]	Opmerkingen
1	1,30	1,49	4,1	0,049	<b>1,9</b>	Golfcondities zijn anders dan in FIG. I.1
2	1,55	1,50	4,5	0,049	<b>2,3</b>	Golfcondities zijn anders dan in FIG. I.1
3	1,75	2,18	7,0	0,023	<b>3,8</b>	Golfcondities zoals gegeven in FIG. I.1
4	2,55	3,20	12,4	0,011	<b>8,2</b>	Golfcondities zijn anders dan in FIG. I.1

Tabel 4.3 Golfcondities waarmee werd gerekend in Steentoets2008.a.3.

#### 4.1.5.3 Resultaten

Tabel 4.4 geeft de belangrijkste resultaten van case a.3. In de tabel is voor de steenzetting per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ . Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de waarden die worden berekend in Steentoets2008.a.3 (St.2008.a.3) en tussen de minimale en maximale waarden die ter vergelijking worden berekend in Steentoets2008.a.2 (St.2008.a.2).

In overeenstemming met case a.2 worden in de tabel uitsluitend de resultaten gegeven, behorende bij  $0 \leq t_{fase} \leq 4$ . Het is niet realistisch om grotere faseverschillen te beschouwen bij het beoordelen van deze case (zie paragraaf 4.1.4.3).

Bijlage A.3.1 geeft een vergelijking van de resultaten van Steentoets2008.a.3 (ononderbroken lijnen) en STEENTOETS2008 (stippellijnen). De vergelijking geeft een indruk van de verschillen tussen case a.3 (met  $H_s \cdot \xi_{op} = 3,8$ ) en STEENTOETS2008. De maatgevende waterstand blijft bij grote getijdenranges gelijk, terwijl die bij de kleinere getijdenranges zakt van NAP+5,0m naar NAP+4,6 en 4,75m. De belastingduur neemt bij grote getijdenranges toe, terwijl de die bij kleine getijdenranges afneemt. Bij  $R_{tij} = 4,0m$  neemt  $t_{belast}$  toe van 1,8 uur tot 4,4 uur. Bij  $R_{tij} = 1,0m$  neemt  $t_{belast}$  af van 4,1 uur tot 3,0 uur. De stabiliteit neemt bij alle getijdenranges af. Bij grote getijdenranges neemt  $f_{gt}$  af van 3,03 tot 1,98. Bij kleine getijdenranges wordt een afname van 2,57 tot 2,39 gemeten.

De bijlagen A.3.2 tot A.3.5 geven een vergelijking van de resultaten van Steentoets2008.a.3 (ononderbroken lijnen) en Steentoets2008.a.2 (stippellijnen). Per bijlage worden de resultaten gegeven, behorende bij één van de onderzochte waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$  (voor de bijlagen A.3.2 t/m A.3.5 is  $H_s \cdot \xi_{op}$  respectievelijk 1,9; 2,3; 3,8 en 8,2).

Resultaten Steentoets2008.a.2 en Steentoets2008.a.3 (voor $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 4$ uur)											
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	$h_{\text{MWS}}$ [m, NAP+]				$t_{\text{belast}}$ [uur]				$f_{\text{gt}}$ [-]	
		St.2008. a.2		St.2008. a.3		St.2008. a.2		St.2008. a.3		St.2008. a.2	St.2008. a.3
		min	max			min	max			min	max
Betonzuilen	$H_s \cdot \xi_{\text{op}} = 1,9$										
	-0,50 tot 0,50	4,75	5,00	4,80	2,1	3,7	2,0	6,14	6,74	8,24	
	-1,00 tot 1,00	4,75	5,00	4,80	1,7	2,8	2,3	6,80	7,61	7,78	
	-1,50 tot 1,50	4,80	5,00	4,80	1,2	2,5	2,6	7,47	8,26	7,29	
	-2,00 tot 2,00	4,80	5,00	4,80	1,1	2,1	3,1	8,15	8,63	6,78	
	$H_s \cdot \xi_{\text{op}} = 2,3$										
	-0,50 tot 0,50	4,70	5,00	5,00	2,1	4,1	1,0	3,84	4,11	5,29	
	-1,00 tot 1,00	4,70	4,90	5,00	2,3	3,0	1,2	4,25	4,58	5,02	
	-1,50 tot 1,50	4,70	4,85	5,00	2,0	2,5	1,3	4,52	4,89	4,73	
	-2,00 tot 2,00	4,70	5,00	5,00	1,1	2,4	1,6	4,88	5,09	4,43	
	$H_s \cdot \xi_{\text{op}} = 3,8$										
	-0,50 tot 0,50	4,35	4,75	5,00	3,9	7,0	3,0	2,57	2,72	2,39	
	-1,00 tot 1,00	4,60	5,00	5,00	1,8	3,6	3,3	2,88	3,03	2,26	
	-1,50 tot 1,50	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	3,8	3,03	3,03	2,13	
	-2,00 tot 2,00	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	4,4	3,03	3,03	1,98	
	$H_s \cdot \xi_{\text{op}} = 8,2$										
	-0,50 tot 0,50	5,00	5,00	5,00	5,7	7,2	8,1	0,51	0,71	0,40	
	-1,00 tot 1,00	5,00	5,00	5,00	4,4	4,9	9,2	0,84	0,97	0,33	
	-1,50 tot 1,50	1,90	5,00	5,00	3,7	18,1	10,5	0,63	1,16	0,30	
	-2,00 tot 2,00	5,00	5,00	5,00	3,2	3,5	12,2	1,22	1,32	0,29	

Tabel 4.4 Resultaten 'Case a.3: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater'.

In Steentoets2008.a.3 werd de belastingduur berekend op basis van de formules uit paragraaf 4.1.5.1. Voor alle faseverschillen leverde dat een zelfde maatgevende waterstand, belastingduur en stabiliteitsgetal op. In Steentoets2008.a.2 werd de belastingduur berekend zoals beschreven in case a.2, waardoor de maatgevende waterstand, belastingduur en het stabiliteitsgetal verschillen per faseverschil.

Bij kleine waarden voor  $H_s \cdot \xi_{\text{op}}$  komt binnen het relevante deel van de grafieken ( $0 \leq t_{\text{fase}} \leq 4$ ) de belastingduur in Steentoets2008.a.3 vrijwel overeen met de belastingduur van Steentoets2008.a.2. Het stabiliteitsgetal vertoont bij kleine getijdenranges een toename van 6,14 naar 8,24. Bij grote getijdenranges vertoont het stabiliteitsgetal daarentegen een afname van 8,63 naar 6,78. Bij de tussenliggende getijdenranges blijft de stabiliteit bij benadering gelijk. Slechts bij faseverschillen van 5 tot 6 uur is in Steentoets2008.a.3 de belastingduur langer en de stabiliteit lager dan in Steentoets2008.a.2.

Bij de grotere waarden voor  $H_s \cdot \xi_{\text{op}}$  is binnen het relevante deel van de grafieken de belastingduur in Steentoets2008.a.3 over het algemeen groter dan de belastingduur van Steentoets2008.a.2. Het stabiliteitsgetal vertoont bij alle getijdenranges een afname. Bij kleine getijdenranges is deze afname het kleinst (van 0,71 naar 0,40) en het grootst bij grote getijdenranges (van 1,32 naar 0,29).

In bijlage A.3.5 wordt een grote piek gegeven in de maatgevende waterstand en belastingduur van Steentoets2008.a.2. De piek wordt veroorzaakt doordat toppen en/of dalen

van het waterstandsverloop net binnen de relevante waterstandrange vallen. Doordat in dat geval wordt gerekend met een lagere maatgevende waterstand, is de fluctuatie bij het stabiliteitsgetal gering.

De verschillen tussen case a.3 en case a.2 worden in Tabel 4.5 uitgedrukt in toename van de blokdikte van de steenzetting. In Steentoets2008.a.2 werd in alle gevallen gerekend met een blokdikte van 0,30m. Daarbij werd in Steentoets2008.a.2 voor alle gevallen een  $f_{gt}$ -waarde berekend. Vervolgens werd in Steentoets2008.a.3 gezocht naar de blokdikte, die dezelfde  $f_{gt}$ -waarde opleverde. De toename in de blokdikte wordt gedefinieerd als: Toename blokdikte = blokdikte<sub>a.3</sub> - blokdikte<sub>a.2</sub>.

Bij kleine waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$  in combinatie met een kleine getijdenrange kan volstaan worden met een kleinere blokdikte. In de andere gevallen zal bij gebruik van Steentoets2008.a.3 een grotere blokdikte toegepast moeten worden. In watersystemen als de Westerschelde zal de blokdikte veelal met 3 tot 4 cm vergroot moeten worden. Dat is een toename van 10 à 13%.

Toename blokdikte [cm] (voor $0 \leq t_{fase} \leq 4$ ) (toename blokdikte = blokdikte <sub>a.3</sub> - blokdikte <sub>a.2</sub> )				
Getijdenrange [m, NAP+]	Hs*ksi [m]			
	1,9	2,3	3,8	8,2
NAP-0,5m tot +0,5m	-1,7	-2,2	1,0	1,1
NAP-1,0m tot +1,0m	-0,8	-1,1	2,2	2,4
NAP-1,5m tot +1,5m	0,7	-1,5	2,7	3,4
NAP-2,0m tot +2,0m	1,3	1,0	3,3	4,4

Tabel 4.5

Toename blokdikte t.o.v. standaard case met blokdikte van 30 cm.

## 4.2 Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden

### 4.2.1 STEENTOETS2008

In STEENTOETS2008 wordt achtereenvolgens stapsgewijs voor vele waterstanden bepaald op welke locatie op het talud het maximale stijghoogteverschil optreedt. In het waterstandverlagingsproces wordt  $h_{toets}$  als startwaarde genomen en vervolgens wordt steeds een iets lagere waterstand doorgerekend. Dit wordt gedaan voor elk afzonderlijke steenzettingsegment. Na het bepalen van de relevante waterstandrange wordt de belastingduur vervolgens berekend door de tijdsintervallen bij elkaar op te tellen, waarvoor gedurende  $-t_{storm}/2 \leq t \leq t_{storm}/2$  uur geldt dat:

$$h_L < h < h_H$$

Waarin:

$h_H$  = bovengrens van de relevante waterstandrange [m, NAP+]

$h$  = hoogte van het waterstandsverloop, behorend bij  $h_{toets}$  (conform HR2006) [m, NAP+]

$h_L$  = ondergrens van de relevante waterstandrange [m, NAP+]

Evenals bij hoger gelegen steenzettingen, wordt ook bij lager gelegen steenzettingen het waterstandverlagingsproces gestart met  $h_{toets}$  als beginwaarde, waarna stapsgewijs een lagere waterstand wordt doorgerekend.

Kenmerkend voor lager gelegen steenzettingen is dat ze niet belast worden bij toetspeil, omdat de waterstand dan zo hoog boven de bovenste overgangsconstructie zit, dat de brekende golven geen belasting geven op deze steenzetting. Deze steenzettingen worden dus alleen belast in het eerste deel van de storm (tijdens stijgende stormopzet), en tijdens het tweede deel van de storm (tijdens dalende stormopzet), maar niet tijdens het hoogtepunt van de storm.

#### 4.2.2 Aanpassing

Bij lager gelegen steenzettingen zal in sommige gevallen een langere belastingduur gevonden worden wanneer met een lagere topwaterstand dan  $h_{\text{toets}}$  gerekend wordt. Het gehele waterstandsverloop komt daardoor lager te liggen. Zie Figuur 3.3. Na het bepalen van de relevante waterstandrange wordt de belastingduur berekend door de tijdsintervallen bij elkaar op te tellen, waarvoor gedurende  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t \leq t_{\text{storm}}/2$  uur geldt dat:

$$h_L < h_{\text{it}} < h_H$$

Waarin:

$h_{\text{it}}$  = hoogte van het waterstandsverloop, behorende bij een topwaterstand, waarvoor geldt:

$$0,0 \text{ [m, NAP+]} + \frac{R_{\text{tij}}}{2} \text{ [m]} + 0,5 \text{ [m]} < \text{topwaterstand} < h_{\text{toets}} \text{ [m, NAP+]}$$

#### 4.2.3 Werkwijze

Om de invloed van deze aanpassing te onderzoeken, is in STEENTOETS2008 een lager gelegen betonzuilensteenzetting ingevoerd met een bovengrens op NAP+0,0m en een ondergrens op NAP-5,0m. De stabiliteit van deze lager gelegen steenzetting werd meerdere keren achtereenvolgens berekend, waarbij  $h_{\text{toets}}$  in de kolom 'toetspeil' in het tabblad 'Toetsgolven' handmatig stap voor stap werd verlaagd van NAP+5,0m tot  $(\text{NAP}+0,0\text{m} + R_{\text{tij}}/2 + 0,5\text{m})$  met een stapgrootte van 0,5m. Voor de verschillende toetspeilen zijn de maatgevende waterstand  $h_{\text{MWS}}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{\text{belast}}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{\text{gt}}$  [-] bepaald. Dit werd gedaan voor vier verschillende getijdenranges.

#### 4.2.4 Resultaten

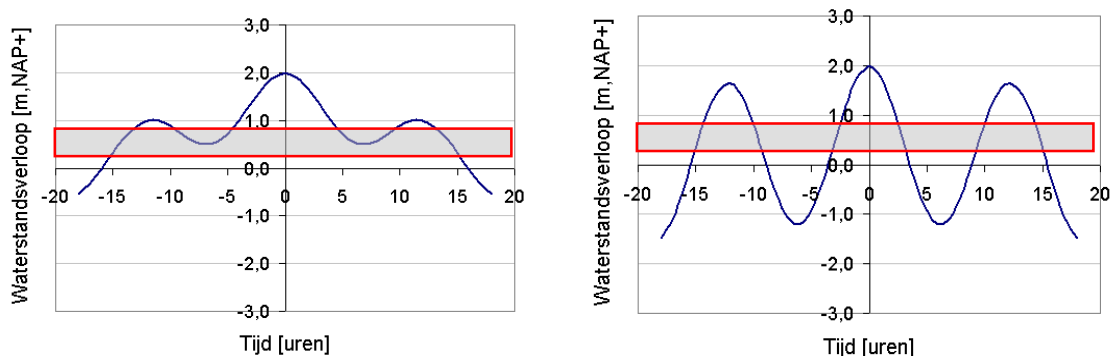
Tabel 4.6 geeft de belangrijkste resultaten van case b. In de tabel is per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$ . De kolommen 'ST.2008' geven de waarden, welke horen bij  $h_{\text{toets}} = \text{NAP}+5,0\text{m}$ . Dat is een toetspeil waarmee in STEENTOETS2008 veelal gerekend wordt. De kolommen 'St.2008.b' geven per getijdenrange de minimale en maximale waarden voor  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$ , zoals die door Steentoets2008.b zijn berekend voor de handmatig ingevoerde toetspeilen:  $(\text{NAP}+0,0\text{m} + R_{\text{tij}}/2 + 0,5\text{m}) \leq h_{\text{toets}} \leq \text{NAP}+5,0\text{m}$ .

Bijlage B.1 geeft het volledige overzicht van de resultaten. De belastingduur neemt vooral bij de kleinere getijdenranges sterk toe naarmate de topwaterstand verlaagd wordt. Daarmee samenhangend neemt de stabiliteit af. Bij lage topwaterstanden is de stabiliteit over het algemeen het laagst bij de kleinere getijdenranges.

Steentoets2008.b geeft een hoge stabiliteit bij een topwaterstand van NAP+5,0m in combinatie met een bovenste overgangsconstructie op NAP+0,0m (zie bijlage B.1, grafiek 'Stabiliteitsgetal als functie van toetspeil', getijdenrange van 3,0m). Steentoets2008.b geeft bij  $h_{toets} = \text{NAP}+5,0\text{m}$  een  $f_{gt}$ -waarde van 10,99, terwijl bij  $h_{toets} = \text{NAP}+4,0\text{m}$  een  $f_{gt}$ -waarde wordt gegeven van 1,11. Bij  $h_{toets} = \text{NAP}+5,0\text{m}$  ligt de maatgevende waterstand enerzijds relatief laag, waardoor met lage golven gerekend wordt. Anderzijds ligt de maatgevende waterstand net hoog genoeg boven de steenzetting, zodat de invloed van golven op de steenzetting beperkt is. In combinatie met een afnemende belastingduur, neemt de stabiliteit sterk toe. STEENTOETS2008 rekt conform de VTV veelal met een toetspeil van circa NAP+5,0m. Aangezien de topwaterstand tijdens een storm veelal lager zal zijn dan NAP+5,0m, geeft STEENTOETS2008 in deze situatie soms onterecht een veel te gunstig resultaat.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.b										
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]			$t_{belast}$ [uur]			$f_{gt}$ [-]		
		ST.2008	St.2008.b		ST.2008	St.2008.b		ST.2008	St.2008.b	
			min	max		min	max		min	max
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	0,30	0,30	0,80	2,2	2,2	17,3	1,34	0,82	1,34
	-1,00 tot 1,00	0,30	0,30	0,80	1,5	1,5	11,2	1,38	1,04	1,38
	-1,50 tot 1,50	0,65	0,40	0,80	1,3	1,3	7,7	10,99	1,11	10,99
	-2,00 tot 2,00	0,40	0,40	0,40	4,8	3,3	4,8	1,15	1,15	1,24

Tabel 4.6 Resultaten 'Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden'.



Figuur 4.4 Waterstandsverlopen bij lagere topwaterstand (schematisch).  
 links: waterstandsverloop ( $t_{storm} = 35$  uur;  $h_{lt} = 2,0$  m;  $R_{tij} = 1,0$  m)  
 rechts: waterstandsverloop ( $t_{storm} = 35$  uur;  $h_{lt} = 2,0$  m;  $R_{tij} = 3,0$  m)

Figuur 4.4 visualiseert voor de berekende betonzuilensteenzetting de invloed van de getijdenrange op de belastingduur bij een lagere topwaterstand (NAP+2,0m). In beide grafieken wordt uitgegaan van een stormduur van 35 uur en een topwaterstand van NAP+2,0m. De getijdenrange is variabel: 1,0m in de linker grafiek en 3,0m in de rechter grafiek.

De belastingduur in de linker grafiek is relatief lang (17,3 uur) als gevolg een niet sterk veranderend waterstandsverloop, waarbij de dalen binnen de relevante waterstandrange vallen. Zodra de getijdenrange groter wordt, vallen nog slechts de steile delen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange. De belastingduur neemt af tot 7,7 uur in de rechter grafiek.



Het linker deel van Figuur 4.4 laat tevens het belang zien van het toetsen van lager gelegen steenzettingen met topwaterstanden, lager dan  $h_{\text{toets}}$ . Bij een topwaterstand van NAP+2,0m vallen de dalen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange. De belastingduur is daardoor groot. Wanneer gerekend wordt met een hogere topwaterstand, zullen de dalen van het waterstandsverloop boven de waterstandrange vallen, waardoor de belastingduur aanzienlijk korter wordt.

De afname van de stabiliteit door deze verandering kan nog wat sterker worden als de afname van de golfhoogte bij afnemende waterstand kleiner is dan hier aangenomen. In de Oosterschelde is dit bijvoorbeeld het geval.

### 4.3 Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen

#### 4.3.1 STEENTOETS2008

In het waterstandverlagingsproces wordt per waterstand een schatting gemaakt van de locatie op het talud waar het stijghoogteverschil maximaal zal zijn. Met deze geschatte locatie als uitgangspunt, wordt in de daaropvolgende stappen de belastingduur bepaald.

In werkelijkheid zijn er 5 verschillende locaties op het talud waar het maximale stijghoogteverschil op kan treden. Zie paragraaf 2.2.2 en Figuur 4.5 t/m Figuur 4.7 voor de aanduiding van de locaties. In STEENTOETS2008 wordt de maximaal belaste locatie op het talud in een vroeg stadium in het rekenproces geschat volgens een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds ingegoten steenzettingen of steenzettingen met een leklengte  $\Lambda$  langer dan 1,5 m en anderzijds steenzettingen met een leklengte  $\Lambda$  korter dan 1,5 m. De locatie op het talud waar het maximale stijghoogteverschil optreedt ( $Z_{\text{belast}}$ ), wordt in STEENTOETS2008 als volgt berekend:

Als ingegoten of  $\Lambda > 1,5$  m:

$$x_s = \left( \frac{H_s}{\tan \alpha} \right) \cdot \min \left( 0,25 + 0,11 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} ; 2,0 \right)$$

$$Z_{\text{belast}} = \max( \min\{ Z_b ; h - x_s \cdot \tan \alpha \} ; Z_o )$$

$Z_{\text{belast}}$  is de locatie aan de voet van een hoog stijghoogtefront.

Als  $\Lambda \leq 1,5$  m:

$$x_{\phi_{\max}} = H_s \cdot \min \left( \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9 ; 6,5 \right)$$

$$B_{\text{klap50\%2\%}} = H_s \cdot (0,96 - 0,11 \xi_{op})$$

$$Z_{\text{belast}} = \max( \min\{ Z_b ; h - (x_{\phi_{\max}} - (B_{\text{klap50\%2\%}} \cdot \cos \alpha) / 2) \cdot \tan \alpha \} ; Z_o )$$

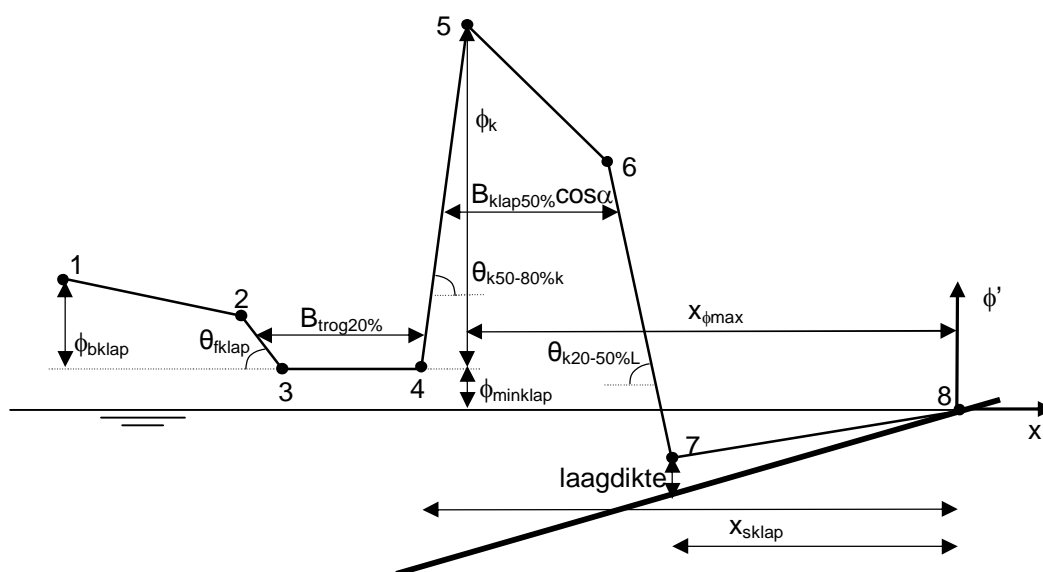
$Z_{\text{belast}}$  ligt vrijwel in het midden tussen de locaties zeewaarts en landwaarts van golfklap type 1.

In feite kan gesteld worden dat de rekenstructuur van Steentoets2008 ten aanzien van dit aspect minder gelukkig gekozen is. De voorlopige keuze van de maximaal belaste locatie kan namelijk totaal verkeerd uitpakken, bijvoorbeeld als er sprake is van een overgangsconstructie. Het had beter geweest als eerst de stijghoogteverschillen voor de vijf belastinggevallen zouden worden berekend, en pas daarna de belastingduur. Dan is er namelijk beter zicht op de invloed van overgangsconstructies en kan beter ingeschat worden op welke locatie de maatgevende belasting aangrijpt.

Deze oplossing van het probleem is bedacht tijdens het kwantificeren van de invloed hiervan op het eindresultaat. Desondanks is in deze paragraaf weergegeven wat de invloed is, en is aan het eind aanbevolen om de structuur van het rekenproces te veranderen.

#### 4.3.2 Aanpassing

Hoewel STEENTOETS2008 de locatie berekent die maatgevend geacht wordt, is het mogelijk nauwkeuriger alle 5 de locaties te berekenen, en dan te kiezen voor de locatie die uiteindelijk de laagste stabiliteit geeft. De vijf belastinglocaties worden in Steentoets2008.c berekend volgens de methode zoals beschreven in de paragrafen 5.9.1 t/m 5.9.3 van Klein Breteler (2009).



Figuur 4.5 Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 1.

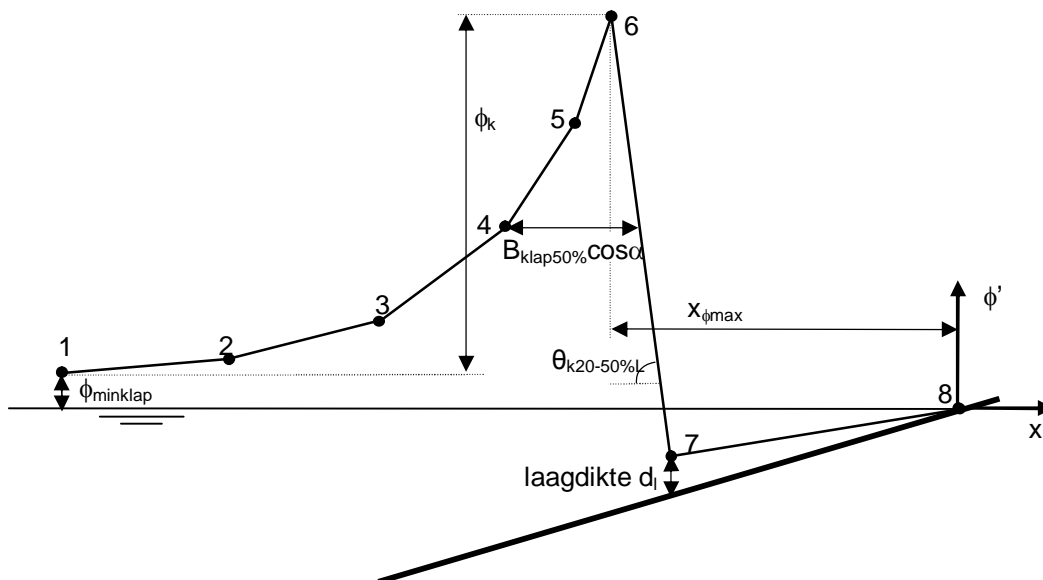
Bij het bepalen van de 5 belastinglocaties wordt onderscheid gemaakt tussen het stijghoogteverloop van 3 golftypen:

- Golfklap type 1: deze golfklap is het gevolg van een overstortende breker, die op enige afstand van het front neerkomt. Zie Figuur 4.5.
- Golfklap type 2: dit stijghoogteverloop is het gevolg van een golfklap op de voet van het front. Zie Figuur 4.6.
- Golf front (zie Figuur 4.7): binnen golf fronten wordt onderscheid gemaakt tussen een hoog en een steil stijghoogtefront. Een hoog stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een grote waarde van  $\phi_b$  en een niet al te grote waarde van  $\theta_f$ . Een steil stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een grote waarde van  $\theta_f$  en een niet al te grote waarde van  $\phi_b$ .

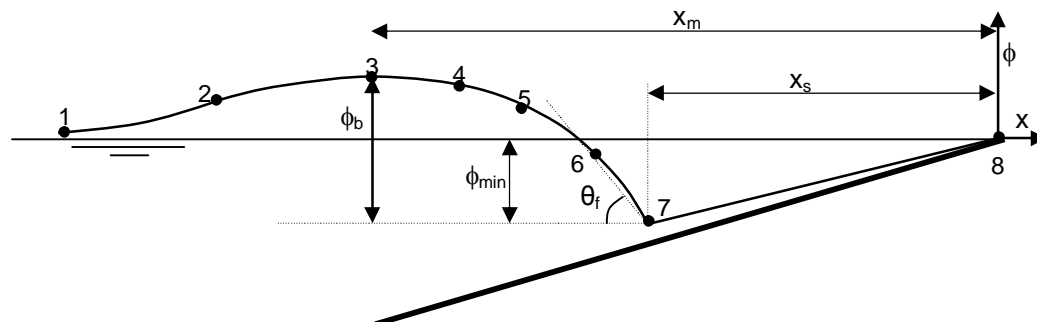
Het maximale stijghoogteverschil kan optreden op de volgende 5 locaties:

- Locatie 1: aan de zeezijde van golfklap type 1. Dit is in punt  $x_4$  van Figuur 4.5.

- Locatie 2: aan de landzijde van golfklap type 1. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 4.5.
- Locatie 3: aan de landzijde van golfklap type 2. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 4.6.
- Locatie 4: aan de landzijde van hoog stijghoogtefront. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 4.7.
- Locatie 5: aan de landzijde van steil stijghoogtefront. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 4.7.



Figuur 4.6 Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 2.



Figuur 4.7 Stijghoogteverloop tijdens een golfhoogtefront.

#### 4.3.3 Werkwijze

Ten behoeve van case c zijn de formules uit paragraaf 4.3.1 in Steentoets2008.c vervangen door de formules, die nodig zijn om de 5 verschillende belastinglocaties te kunnen berekenen. Dat betekent dat er series berekeningen zijn gemaakt, waarbij aan het begin van het rekenproces steeds één van de locaties als maatgevende locatie is gesteld. Voor die locatie is vervolgens de belastingduur bepaald.

Later in het rekenproces blijkt soms dat een andere locatie maatgevend is. In de figuren en in tabellen wordt steeds gerefereerd naar de aan het begin van het rekenproces gekozen locatie.

In Steentoets2008.c zijn twee type steenzettingen ingevoerd: een betonzuilensteenzetting en een blokkensteenzetting. Per steenzetting is voor elke belastinglocatie voor vier verschillende getijdenranges berekend hoe groot de waarden zijn voor de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{belast}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$  [-]. Tevens is berekend welke resultaten STEENTOETS2008 geeft.

## 4.3.4 Resultaten

Tabel 4.7 geeft de belangrijkste resultaten van case c. In de tabel is per type steenzetting en per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ . De kolommen 'ST.2008' geven de waarden, zoals die berekend zijn door STEENTOETS2008. De kolommen 'St.2008.c' geven per getijdenrange de minimale en maximale waarden voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ , zoals die door Steentoets2008.c zijn berekend voor de 5 belastinglocaties.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.c										
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]			$t_{belast}$ [uur]			$f_{gt}$ [-]		
		ST.2008	St.2008.c		ST.2008	St.2008.c		ST.2008	St.2008.c	
			min	max		min	max		min	max
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	4,75	4,75	5,00	4,1	3,5	6,3	2,57	1,68	2,58
	-1,00 tot 1,00	4,60	4,60	5,00	3,6	2,5	5,0	2,97	1,88	2,98
	-1,50 tot 1,50	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	4,3	3,03	2,02	3,03
	-2,00 tot 2,00	5,00	5,00	5,00	1,8	1,8	3,7	3,03	2,16	3,03
Blokken	-0,50 tot 0,50	4,20	4,20	5,00	6,1	6,1	6,7	0,87	0,71	0,87
	-1,00 tot 1,00	3,95	3,80	4,75	5,5	5,5	5,9	0,91	0,85	0,91
	-1,50 tot 1,50	3,95	3,80	4,75	4,7	4,6	5,0	0,94	0,88	0,94
	-2,00 tot 2,00	3,95	3,80	4,75	4,1	4,1	4,4	0,97	0,91	0,97

Tabel 4.7 Resultaten 'Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen'.

De bijlagen C.1 t/m C.3 geven een volledig overzicht van de resultaten van case c. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de steenzetting van betonzuilen en de steenzetting van blokken:

- **Betonzuilensteenzetting (leklengte  $\Lambda = 0,36$  m):**  
Voor de ingevoerde betonzuilensteenzetting geldt dat de maatgevende waterstand voor alle belastinglocaties vrijwel gelijk is. De belastingduur vertoont fluctuaties. Bij de belastinglocaties 1 en 5 is  $t_{belast}$  soms iets hoger en soms iets lager dan in STEENTOETS2008. Bij belastinglocatie 4 is  $t_{belast}$  steeds circa 1,4 tot 2,5 uur hoger. De stabiliteit van de steenzettingen is bij de belastinglocaties 2 en 3 ongeveer gelijk aan de stabiliteit zoals STEENTOETS2008 die berekent. Bij de locaties 1, 4 en 5 is de stabiliteit in alle gevallen lager dan in STEENTOETS2008. Voor alle getijdenranges geeft belastinglocatie 4 de laagste stabiliteit.
- **Blokkensteenzetting (leklengte  $\Lambda = 0,95$  m):**  
Voor de ingevoerde blokkensteenzetting geldt dat de maatgevende waterstand voor de meeste belastinglocaties vrijwel gelijk is. Alleen bij belastinglocatie 4 wordt een iets hogere maatgevende waterstand gevonden. De belastingduur is per getijdenrange vrijwel gelijk voor de verschillende belastinglocaties. De stabiliteit van de blokkensteenzetting is in alle gevallen vrijwel gelijk. Slechts bij belastinglocatie 4 is de stabiliteit enigszins lager dan in STEENTOETS2008.

Zowel de blokken- als de betonzuilensteenzetting heeft een leklengte  $\Lambda < 1,5$  m. Bij een dergelijke leklengte zal volgens STEENTOETS2008 doorgaans het maximale stijghoogteverschil optreden tussen de belastinglocaties 1 en 2.

Uit de figuren blijkt dat wanneer toch gekozen wordt voor belastinglocatie 4 bij het bepalen van de belastingduur, er een lagere stabiliteit verkregen wordt. Dit geeft een indruk van de invloed die een verkeerd gekozen locatie heeft op het eindresultaat.

#### 4.4 Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd

##### 4.4.1 STEENTOETS2008

In STEENTOETS2008 wordt de waterstand stapsgewijs verlaagd. Per waterstand wordt de stabiliteit van de steenzetting berekend. Daarbij wordt per waterstand in de gehele berekening uitgegaan van dezelfde significante golfhoogte  $H_s$ . Hiervoor wordt de  $H_s$  gebruikt, die volgens de invoer van het tabblad 'Toetsgolven' bij de betreffende waterstand hoort.

##### 4.4.2 Aanpassing

Het is nauwkeuriger om te werken met golfhoogten, die kunnen variëren met de tijd en de waterstand. De aanpassingen in Steentoets2008.d zijn onder te brengen in 2 delen:

- Verandering relevante waterstandrange
- Verandering belastinggrootte

###### *Verandering relevante waterstandrange*

In Steentoets2008.d wordt aangenomen dat de golfhoogte  $H_s$  evenredig verloopt met de stormopzet.  $H_s$  zal gedurende de eerste helft van de storm geleidelijk toenemen. De laatste helft van de storm neemt  $H_s$  weer langzaam af. Door de originele golfhoogte  $H_s$  te vermenigvuldigen met een factor,  $f_{H_s}$ , wordt met een aangepaste golfhoogte  $H_{s,f}$  gerekend waarin de toename en afname is verdisconteerd.

De factor  $f_{H_s}$  is evenredig gekozen met de stormopzet. De stormopzet voor de gebieden, anders dan de Oosterschelde, de bovenrivieren en de benedenrivieren dg. 3-5, wordt gegeven door de onderstaande formules:

Als  $0 \leq t < 2$  uur:

$$h_{opzet} = -0,05 \cdot t + \left( h_{toets} - \left( \frac{R_{tij}}{2} \right) \right)$$

Als  $2 \leq t \leq t_{storm}/2$  uur:

$$h_{opzet} = \left\{ h_{toets} - \left( \frac{R_{tij}}{2} \right) - 0,1 \right\} \left\{ 1 - \left( \frac{t-2}{t_{storm}/2-2} \right) \right\}$$

De factor  $f_{H_s}$  wordt vervolgens berekend voor het midden van elke tijdstap, vanaf  $t = 0$  uur tot  $t = t_{storm}/2$  uur. Het midden van elke tijdstap wordt gegeven door:

$$t_i = \frac{t(2) + t(1)}{2}$$

De factor voor  $0 \leq t \leq t_{storm}/2$  uur wordt gegeven door de formule:

$$f_{H_s} = \frac{h_{opzet}}{h_{toets} - \left(\frac{R_{tij}}{2}\right)} \cdot 0,99 + 0,01$$

Voor  $t = 0$  uur geldt  $f_{H_s} = 1$  en voor  $t = t_{storm}/2$  uur geldt dat  $f_{H_s} = 0,01$ .

De waarde  $f_{H_s} = 0,01$  is laag gekozen, waardoor verondersteld wordt dat er geen relevante golven zijn aan het begin en eind van een storm. Deze aanname is gedaan om een beter inzicht te krijgen in de invloed van deze mogelijke aanpassing. Indien de mogelijke aanpassing eventueel definitief in Steentoets wordt doorgevoerd, is het noodzakelijk het golfhoogteverloop nauwkeuriger te onderzoeken.

De aangepaste golfhoogte wordt vervolgens berekend:

$$H_{s,f} = H_s \cdot f_{H_s}$$

Met deze aangepaste golfhoogte  $H_{s,f}$  wordt per tijdstap de boven- en ondergrens van de relevante waterstandsrange bepaald:

$$\text{Ondergrens relevante waterstandsrange: } h_L = Z_{belast} + 0,2 \cdot H_{s,f} \cdot \min(\xi_{op}; 4)$$

$$\text{Bovengrens relevante waterstandsrange: } h_H = Z_{belast} + 0,6 \cdot H_{s,f} \cdot \min(\xi_{op}; 4)$$

Door in de bovenstaande formules voor  $h_L$  en  $h_H$  de aangepaste golfhoogte  $H_{s,f}$  te gebruiken, wil de relevante waterstandsrange enerzijds naar beneden, doordat  $H_{s,f}$  kleiner is dan  $H_s$  (m.u.v. als  $t = 0$  uur). Anderzijds wil de relevante waterstandsrange naar boven, doordat de zwaarst belaste locatie bij een kleinere golfhoogte hoger op het talud komt te liggen.

Door in de formules voor  $h_L$  en  $h_H$  te rekenen met  $H_{s,f}$  wordt de range smaller als  $t$  klein of groter is. Aan het begin en aan het eind van de storm zorgt een lagere golfhoogte over het algemeen dus voor een kortere belastingduur.

#### *Verandering belastinggrootte*

Afhankelijk van het tijdstip in de storm zullen golven groter of kleiner zijn. De invloed van golven op de stabiliteit is aan het begin en aan het einde van een storm geringer dan de invloed midden in de storm (op  $t = 0$  uur).

Bij het berekenen van de totale belastingduur zal in Steentoets2008.d deze geringere golfinvloed verdisconteerd worden middels het toevoegen van een factor  $f_{tijd}$ . Het principe daarvan wordt onderstaand toegelicht. Het uitgangspunt daarbij is dat alleen de golven groter dan de 5% overschrijdingswaarde, behorende bij het toetspeil, bijdragen aan het aantasten van de stabiliteit. Dat percentage is arbitrair gekozen. Deze keuze zal geen significante invloed hebben op de conclusies van dit onderzoek, maar wanneer deze aanpassing in Steentoets wordt doorgevoerd, dan wordt aanbevolen het percentage nauwkeuriger te bepalen.

Uitgangspunt voor de methode is de veronderstelling dat alleen de golven boven een bepaalde waarde bijdragen aan de instabiliteit van de steenzetting. Het idee is dat hele kleine golven zo'n klein stijghoogteverschil veroorzaken dat de steenzetting hiervoor tot in het oneindige stabiel zal zijn. Zij dragen dus niet bij aan het effect van de belastingduur.

De vraag is dan: welke golven dragen bij aan de instabiliteit? Gezien het feit dat we in Steentoets voornamelijk rekenen met de 2%-overschrijdingswaarde van de belasting, lijkt het

logisch om met de hoogste 5% van de golven te werken. Het gemiddelde van die 5% komt namelijk vrij redelijk overeen met de 2%-overschrijdingswaarde.

De rekenmethode is erop gericht de belasting in een bepaald tijdsinterval (waar de  $H_s$  wat lager is dan op toetspeil) om te rekenen naar een korter tijdsinterval, maar dan met dezelfde golfhoogte als bij toetspeil. Om dit te kunnen doen, wordt eerst de golfhoogte berekend die door 5% van de golven bij toetspeil worden overschreden:  $H_{5\% \text{toetspeil}}$ . Vervolgens gaan we bekijken hoeveel % van golven in het betreffende tijdsinterval groter zijn dan  $H_{5\% \text{toetspeil}}$ . Gezien het feit dat de  $H_s$  in het tijdsinterval kleiner is dan bij toetspeil, zal dit percentage kleiner zijn dan 5%. Dit percentage is  $p\%$ .

Tenslotte wordt de effectieve belastingduur berekend door de duur van het tijdsinterval te vermenigvuldigen met  $p/5$ . Onderstaand is dit nader geconcretiseerd in de vorm van formules.

Volgens de Rayleigh-verdeling geldt:

$$\frac{H_{x\%}}{H_s} = \sqrt{\frac{\ln(x)}{\ln(0,135)}}$$

Met de bovenstaande formule als uitgangspunt wordt onderstaand de golfhoogte berekend, die volgens de Rayleigh-verdeling een overschrijdingspercentage heeft van 5%.

$$H_{5\%} = \sqrt{\frac{\ln(0,05)}{\ln(0,135)}} \cdot H_s$$

Er wordt voor gekozen om de  $H_{5\%}$  te berekenen voor de golfhoogte  $H_s$  behorende bij de actuele waterstand  $h_{\text{actueel}}$ . In STEENTOETS2008 wordt de golfhoogte  $H_{s,h,\text{actueel}}$  immers gebruikt om de belastingduur te berekenen gedurende de gehele stormduur.

Vervolgens worden de aangepaste golfhoogte  $H_{s,f}$  en de boven- en ondergrens van de relevante waterstandrange  $h_H$  en  $h_L$  berekend, zoals reeds eerder in deze paragraaf werd beschreven.

Daarna wordt voor de aangepaste golfhoogte bepaald hoeveel % van de golven groter zal zijn dan de aan het begin berekende  $H_{5\%}$ . De hypothese is dat alleen de golven, groter dan  $H_{5\%}$ , meetellen bij het al of niet instabiel worden van de steenzetting. Dit percentage wordt als volgt berekend:

$$\text{Percentage golven groter dan } H_{5\%} \text{ is } e^{\left(\frac{H_{5\%}}{H_{s,f}}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}$$

Dat percentage wordt vergeleken met 5%. Deze vergelijking levert tenslotte de factor  $f_{\text{tijd}}$  op. De factor bepaalt per tijdstap welk deel van de belastingduur effectief als belastingduur meetelt en welk deel niet.

$$f_{\text{tijd}} = \frac{e^{\left(\frac{H_{5\%}}{H_{s,f}}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}}{0,05}$$

Tenslotte worden de effectieve belastingduren van alle tijdstappen bij elkaar opgeteld.

De rekenstructuur van Steentoets is op diverse punten gewijzigd. In STEENTOETS2008 werd een begintijdstip en een eindtijdstip berekend van elk belastingduur tijdsinterval. Die afzonderlijke belastingduurperiodes werden vervolgens bij elkaar opgeteld om de totale belastingduur te berekenen. In Steentoets2008.d is deze methode gewijzigd in een procedure waarin over alle tijdstappen de tijd die effectief bijdraagt aan de belastingduur wordt opgeteld.

#### 4.4.3 Werkwijze

Door middel van het berekenen van case d is geschat hoe groot de invloed is op de belastingduur en de stabiliteit van een steenzetting, als gevolg van het rekenen met een golfhoogte die verloopt met de tijd en waterstand. Ten behoeve van de case zijn de formules en de rekenstructuur van STEENTOETS2008 vervangen door de formules en de rekenstructuur, zoals beschreven in paragraaf 4.4.2.

In Steentoets2008.d zijn twee type steenzettingen ingevoerd: een betonzuilensteenzetting en een blokkensteenzetting. Voor beide steenzettingen is berekend hoe groot de waarden zijn voor de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{belast}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$  [-]. Daarbij werd per type steenzetting gevarieerd in het niveau van de bovenste overgangsconstructie ( $Z_b$ ) van  $Z_b = NAP+5,5m$  tot  $Z_b = NAP+0,0m$ .

Hier wordt het niveau van de bovenste overgangsconstructie beschouwd omdat dit bepalend is voor de grootte van de belasting en de belastingduur. Wanneer de bovengrens van een steenzetting laag ligt, is het niveau van de maatgevende waterstand lager, en zal voor die steenzetting een lagere belastinglocatie berekend worden, dan wanneer de bovengrens hoog ligt. De uiteindelijke stabiliteit hangt vervolgens in grote mate af van die belastinglocatie en maatgevende waterstand.

De waarden  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$  zijn per type steenzetting, zowel in STEENTOETS2008 als in Steentoets2008.d, berekend voor vier verschillende getijdenranges.

#### 4.4.4 Resultaten

Tabel 4.8 geeft de belangrijkste resultaten van case d. In de tabel wordt per steenzetting en per getijdenrange weergegeven voor welk niveau van de bovenste overgangsconstructie  $Z_b$  het verschil tussen de resultaten van STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d het grootst is. Voor de  $Z_b$  waarbij het verschil maximaal is, worden de bijbehorende waarden voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$  gegeven. De kolommen 'ST' en 'St.d' geven de resultaten, zoals die door respectievelijk STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d zijn berekend.

De bijlagen D.1 en D.2 geven een volledig overzicht van de resultaten van case d. Wat betreft de maatgevende waterstand en de belastingduur zijn bij de betonzuilen- en de blokkensteenzetting in hoofdlijnen dezelfde trends zichtbaar. Naarmate het niveau van de bovenste overgangsconstructie  $Z_b$  lager ligt, wordt de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  lager. Daarbij is er weinig verschil tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d. Voor de belastingduur geldt dat de resultaten van STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d niet veel van elkaar verschillen als  $Z_b$  tussen NAP+3,0 en +5,0m ligt. Bij lagere  $Z_b$ 's tussen NAP+0,0 en +2,5m is wel een groot verschil zichtbaar tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d. De belastingduur neemt in dat geval af van ongeveer 7 tot 14 uur tot circa 1 uur.

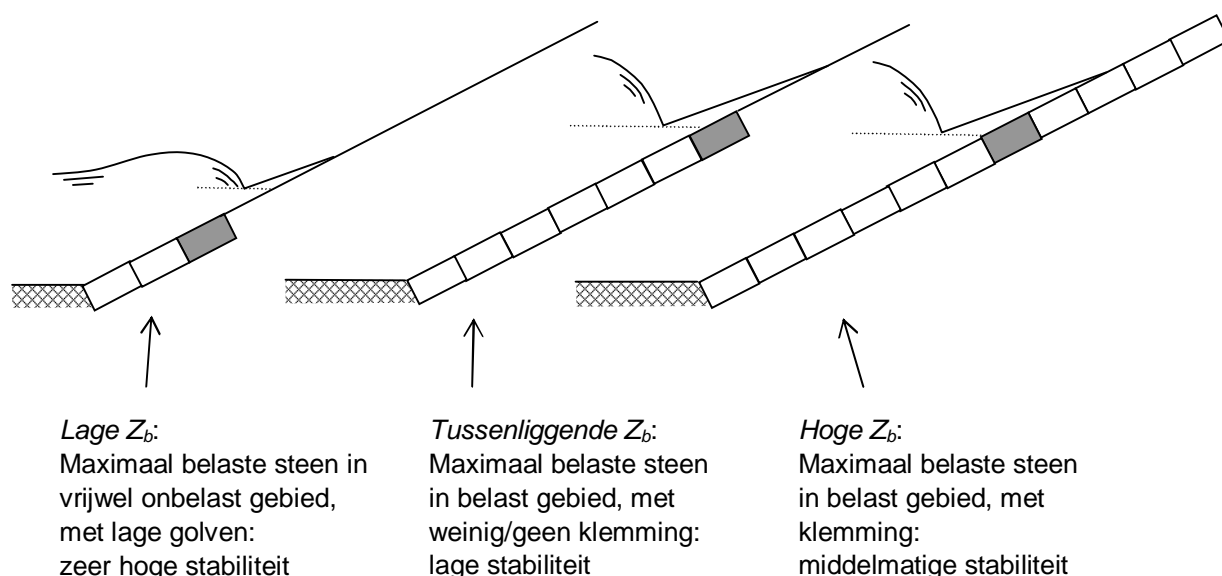


Bij beide steenzettingen zijn er bij  $Z_b$ 's hoger dan NAP+3,0m geen grote stabiliteitsverschillen tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d. Bij lagere  $Z_b$ 's zijn wel verschillen zichtbaar. In Steentoets2008.d is de stabiliteit hoger dan in STEENTOETS2008. Bij de betonzuilensteenzetting neemt  $f_{gt}$  toe van bijvoorbeeld 1,4 tot 1,7. Bij de blokkensteenzetting neemt  $f_{gt}$  toe van 0,5 tot 1,0.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d										
Steenzett.	Getijdenrange [m, NAP+]	Waarden t.p.v. maximaal verschil tussen ST.2008 en St.2008.d								
		Maatg. waterstand			Belastingduur			Stabiliteitsgetal		
		$Z_b$ [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]		$Z_b$ [m, NAP+]	$t_{belast}$ [uur]		$Z_b$ [m, NAP+]	$f_{gt}$ [-]	
			ST	St.d		ST	St.d		ST	St.d
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	5,0	4,75	5,00	1,5	13,1	1,3	1,5	1,42	2,03
	-1,00 tot 1,00	1,0	1,45	2,25	1,5	12,7	1,3	1,0	1,73	40,33
	-1,50 tot 1,50	1,0	1,45	2,25	1,5	10,5	1,3	1,0	1,70	40,33
	-2,00 tot 2,00	2,5	2,95	3,15	2,0	7,2	1,4	1,5	1,55	2,03
Blokken	-0,50 tot 0,50	4,0	4,20	5,00	1,5	13,7	1,4	1,5	0,53	1,05
	-1,00 tot 1,00	4,0	3,95	5,00	1,0	12,9	1,3	1,5	0,51	1,05
	-1,50 tot 1,50	4,0	3,95	5,00	1,5	10,6	1,4	2,0	0,46	0,96
	-2,00 tot 2,00	1,5	2,80	2,60	1,5	8,3	1,4	1,5	0,56	1,05

Tabel 4.8

Resultaten 'Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd'.



Figuur 4.8

Invloed van niveau bovenste overgangsconstructie op stabiliteit van betonzuilensteenzetting.

Bij de betonzuilensteenzetting zien we een kenmerkend verloop van de stabiliteit als functie van  $Z_b$ . Dat verloop wordt toegelicht op basis van Figuur 4.8. Bij een hoge  $Z_b$  (van NAP+5,0m tot +5,5m) is de stabiliteit relatief hoog vanwege de aanwezigheid van klemming in de steenzetting. Wanneer  $Z_b$  lager wordt, zullen er steeds minder betonzuilen op het talud boven de maximaal belaste steen liggen. Daardoor neemt de klemming af. Dat geeft voor tussenliggende  $Z_b$ 's (van NAP+1,5m tot +4,5m) in combinatie met een relatief hoge

maatgevende waterstand een lage stabiliteit. Bij lage  $Z_b$ 's (van NAP+0,0m tot +1,5m) neemt de stabiliteit sterk toe. Dit is een gevolg van enkele invloeden die elkaar versterken. Grotendeels wordt het veroorzaakt door een lage maatgevende waterstand (en daardoor lage golven), waardoor de 'maximaal belaste steen' vrijwel niet belast wordt. Daarnaast wordt het versterkt door de kortere belastingduur.

Bij de blokkensteenzetting is het beschreven verloop minder duidelijk aanwezig, vanwege de afwezigheid van klemming.

#### 4.5 Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd

##### 4.5.1 STEENTOETS2008

In STEENTOETS2008 wordt de waterstand stapsgewijs verlaagd. Per waterstand wordt de belastingduur berekend en wordt de steenzetting op stabiliteit getoetst. Daarbij wordt per waterstandstap in de gehele berekening uitgegaan van dezelfde golfsteilheid  $s_{op}$ . Hiervoor wordt de  $s_{op}$  gebruikt, die bij de betreffende waterstand hoort.

##### 4.5.2 Aanpassing

In werkelijkheid zal de golfsteilheid niet gedurende de hele storm hetzelfde zijn. Het is nauwkeuriger om in de berekeningen te werken met een golfsteilheid die kan variëren. Binnen de aanpassing in case e wordt gesteld dat de golfsteilheid het grootst is aan het begin van de storm en langzaam afneemt tot het einde van de storm.

In deze aanpassing wordt aangenomen dat de golfsteilheid in het midden van de storm  $s_{op,middenstorm}$ , waarmee gerekend zal worden in Steentoets2008.e, gelijk is aan de golfsteilheid  $s_{op}$ , waarmee in STEENTOETS2008 gerekend wordt gedurende de hele storm. Aangenomen wordt dat de golfsteilheid aan het begin van de storm 20 procent hoger is dan in het midden. Aan het einde van de storm is die 20 procent lager dan in het midden.

Voor de in deze case ingevoerde steenzettingen en hydraulische randvoorwaarden wordt eerst bepaald wat de relatie is tussen de golfsteilheid, de bezwijkgolffoogte en het tijdstip in de storm.

Om te bepalen hoe lang de waterstand in de waterstandrange zit, wordt de storm verdeeld in stukjes van 1 uur. Het begin van zo'n tijdstap is  $t(1)$  en het eind van elke tijdstap is  $t(2)$ .

De relatie wordt berekend voor de tijdstippen  $t_i$ , voor  $-t_{storm}/2 \text{ uur} \leq t \leq t_{storm}/2 \text{ uur}$ . Daarbij ligt  $t_i$  steeds midden tussen de tijdstippen  $t(1)$  en  $t(2)$ :

$$t_i = \frac{t(2) + t(1)}{2}$$

Voor  $s_{op}$  worden afhankelijk van het moment in de storm de volgende waarden aangehouden:

$$\begin{aligned} s_{op,middenstorm} &= 0,0227 \\ s_{op,beginstorm} &= s_{op,middenstorm} + 0,2 \cdot s_{op,middenstorm} \\ s_{op,eindstorm} &= s_{op,middenstorm} - 0,2 \cdot s_{op,middenstorm} \end{aligned}$$

De golfsteilheid  $s_{op}$  is dan als lineaire functie van  $t_i$  voor  $-t_{storm}/2 \leq t \leq t_{storm}/2$  uur als volgt te schrijven:

$$s_{op} = \frac{s_{op,eindstorm} - s_{op,beginstorm}}{t_{storm}} \cdot t_i + s_{op,middenstorm}$$

De brekerparameter wordt in het interval  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur vervolgens voor iedere  $t_i$  als volgt berekend:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}}$$

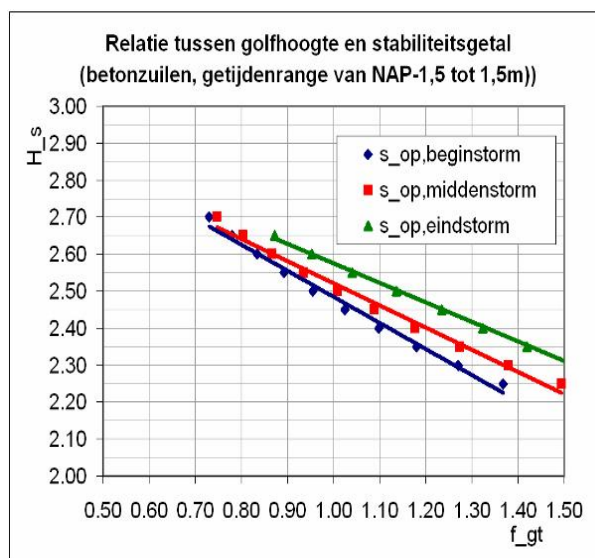
Met deze verlopende brekerparameter wordt per tijdstap de bovengrens  $h_H$  en ondergrens  $h_L$  van de relevante waterstandrange bepaald.

De invloed van de afwijkende  $s_{op}$  op de stabiliteit is verdisconteerd door te rekenen met een afwijkende bezwijkgolffoogte, en dus een afwijkende  $H_{5\%}$ . Als bij een afwijkende  $s_{op}$  de waarde van  $H_{5\%}$  groter wordt, zijn er in het betreffende tijdsinterval minder golven die groter zijn dan die  $H_{5\%}$  en wordt dit tijdsinterval minder meegeteld.

Met behulp van Steentoets worden voor  $s_{op,beginstorm}$ ,  $s_{op,middenstorm}$  en  $s_{op,eindstorm}$  de bijbehorende bezwijkgolffoogten  $H_{s,bezwijk}$  bepaald. Dat is gedaan door een aantal golffoogten uit te zetten tegen de bijbehorende  $f_{gt}$ -waarden. Dit is gedaan voor de verschillende  $s_{op}$ -waarde en per getijdenrange. De bezwijkgolffoogte  $H_{s,bezwijk}$  is de golffoogte, welke hoort bij  $f_{gt} = 1,00$ .

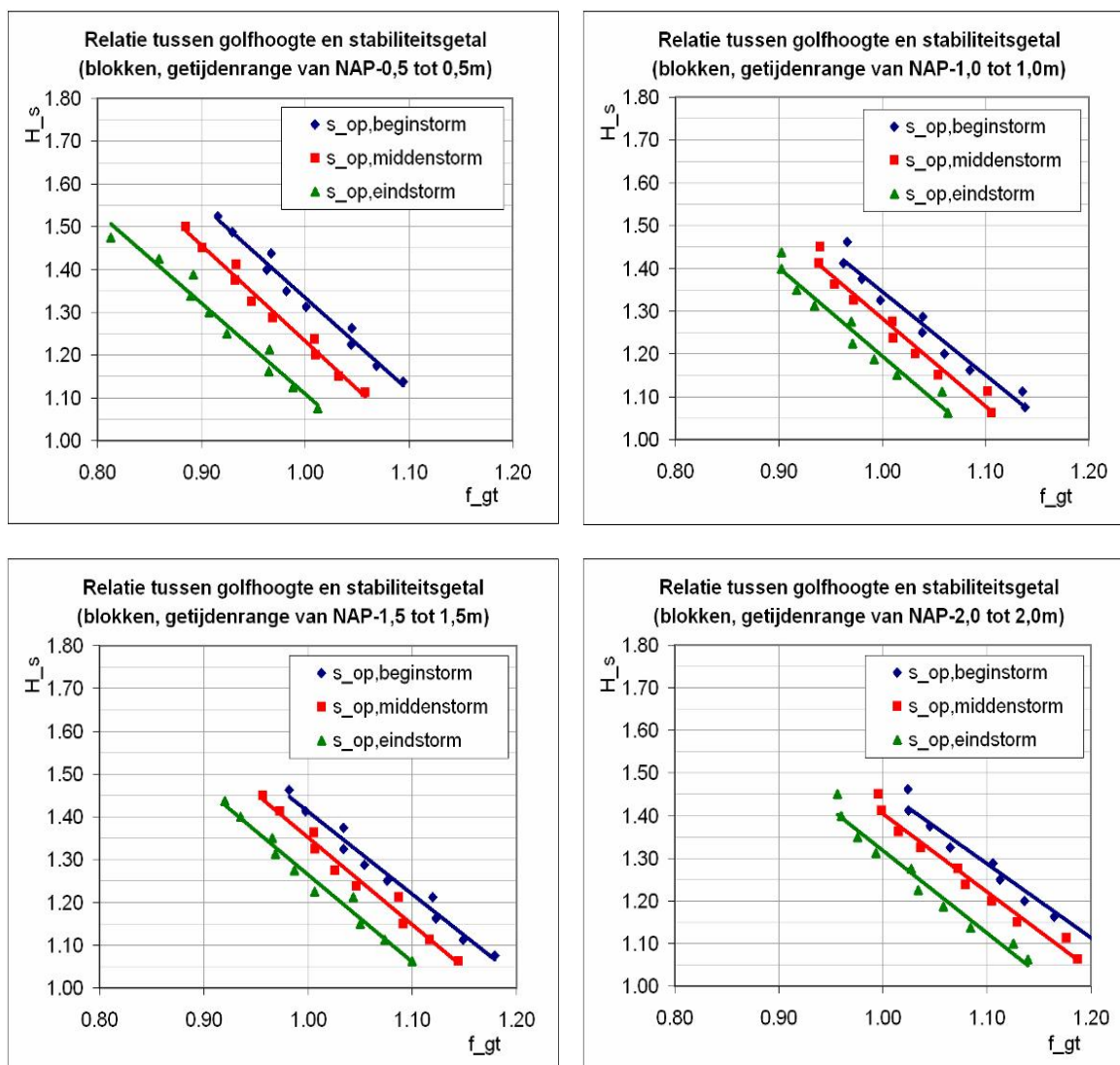
Zie Figuur 4.9 en Figuur 4.10 voor de resultaten voor respectievelijk de betonzuilen- en de blokkensteenzetting. Figuur 4.9 toont ter indicatie het resultaat van slechts één getijdenrange: van NAP-1,5 tot 1,5m. De lijnen liggen bij de betonzuilensteenzetting voor alle getijdenranges verhoudingsgewijs dermate dicht bij elkaar, dat de onderlinge verschillen in deze case verwaarloosd worden.

De bezwijkgolffoogten die uit Figuur 4.10 (blokkensteenzetting) zijn af te lezen, worden in Figuur 4.11 weergegeven als functie van de golffoogte.



Figuur 4.9

Relatie tussen golffoogte en stabiliteitsgetal (steenzetting: betonzuilen)



Figuur 4.10 Relatie tussen golfhoogte en stabiliteitsgetal (steenzetting: blokken)

Op basis van de lijnen uit Figuur 4.11 wordt voor vier verschillende  $R_{tij}$ -intervallen, de functie  $H_{s,bezwijk}$  bepaald.  $H_{s,bezwijk}$  is direct afhankelijk van  $s_{op}$  en indirect dus van  $t_i$ . Tevens wordt onderstaand voor de  $R_{tij}$ -intervallen de bezwijkgolfhoogte in het midden van de storm,  $H_{s,bezwijk,midden}$ , bepaald. Merk op dat een getijdenrange van NAP-0,5 tot 0,5m overeenkomt met  $R_{tij} = 1,0m$ .

Voor de blokkensteenzetting worden de volgende formules bepaald:

Voor  $0,5 \leq R_{tij} < 1,5$ :  $H_{s,bezwijk} = 24,76 \cdot s_{op} + 0,66$  (voor  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur)

$$H_{s,bezwijk,midden} = 24,76 \cdot s_{op,middenstorm} + 0,66$$

Voor  $1,5 \leq R_{tij} < 2,5$ :  $H_{s,bezwijk} = 16,59 \cdot s_{op} + 0,90$  (voor  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur)

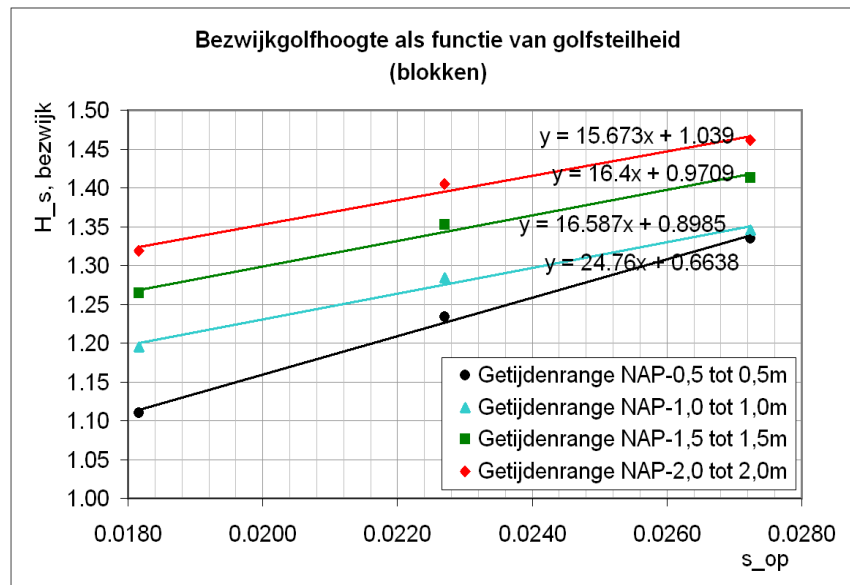
$$H_{s,bezwijk,midden} = 16,59 \cdot s_{op,middenstorm} + 0,90$$

Voor  $2,5 \leq R_{tij} < 3,5$ :  $H_{s,bezwijk} = 16,40 \cdot s_{op} + 0,97$  (voor  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur)

$$H_{s,bezwijk,midden} = 16,40 \cdot s_{op,middenstorm} + 0,97$$

Voor  $3,5 \leq R_{tij} < 4,5$ :  $H_{s,bezwijk} = 15,67 \cdot s_{op} + 1,04$  (voor  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur)

$$H_{s,bezwijk,midden} = 15,67 \cdot s_{op,middenstorm} + 1,04$$



Figuur 4.11 Relatie tussen bezwijkgolfhoogte en golfsteilheid (steenzetting: blokken)

Voor de betonzulensteenzetting wordt aangenomen dat  $H_{s,bezwijk} = H_{s,bezwijk,midden}$ . Dit is het gevolg van de verwaarlozing van het verloop van  $H_s$  als functie van  $f_{gt}$ .

Vervolgens wordt de factor  $f_{H_s,bezwijk}$  berekend. Deze factor geeft voor elk willekeurig tijdstip  $t_i$  in het interval  $-t_{storm}/2 \leq t_i \leq t_{storm}/2$  uur aan hoe groot de bezwijkgolfhoogte is, ten opzichte van de bezwijkgolfhoogte halverwege de storm (op  $t = 0$  uur).

$$f_{H_s,bezwijk} = \frac{H_{s,bezwijk}}{H_{s,bezwijk,midden}}$$

Voor de blokkensteenzetting is  $f_{H_s,bezwijk}$  variabel. Voor de betonzulensteenzetting geldt dat  $f_{H_s,bezwijk} = 1$ .

Naarmate de storm verstrijkt, zal de bezwijkgolfhoogte kleiner worden. Door in Steentoets2008.e de factor  $f_{H_s,bezwijk}$  toe te voegen, wordt daarmee rekening gehouden.

Volgens de Rayleigh-verdeling geldt:

$$\frac{H_{x\%}}{H_s} = \sqrt{\frac{\ln(x)}{\ln(0,135)}}$$

Daarmee wordt onderstaand de golfhoogte berekend, die volgens de Rayleigh-verdeling een overschrijdingspercentage heeft van 5%. De hypothese is dat alleen de golven, groter dan

$H_{5\%}$ , mee zullen tellen bij het al of niet instabiel worden van de steenzetting. In de formule is  $H_s$  de golfhoogte, behorende bij de waterstand waarmee in STEENTOETS2008 gerekend wordt. Het percentage van 5% is arbitrair gekozen. Deze keuze heeft geen significante invloed op de conclusies van dit onderzoek, maar wanneer deze aanpassing eventueel in Steentoets wordt doorgevoerd, dan wordt aanbevolen het percentage nauwkeuriger te bepalen.

$$H_{5\%} = \sqrt{\frac{\ln(0,05)}{\ln(0,135)}} \cdot H_s$$

De golfhoogte, met een overschrijdingspercentage van 5%, zal afnemen naarmate de bezwijkgolfhoogte afneemt. De aangepaste  $H_{5\%}$  wordt als volgt berekend:

$$H_{5\%,f} = f_{H_s,bezwijk} \cdot H_{5\%}$$

Met deze aangepaste  $H_{5\%,f}$  wordt bepaald hoeveel % van de golven groter zal zijn dan  $H_{5\%}$ .

Percentage golven groter dan  $H_{5\%}$  is  $e^{\left(\frac{H_{5\%,f}}{H_s}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}$

Dat percentage wordt vergeleken met 5%. Deze vergelijking levert tenslotte de factor  $f_{t_{ijd}}$  op. De factor bepaalt, evenals in case d, per tijdstap welk deel van de belastingduur effectief als belastingduur meegeteld mag worden en welk deel niet.

$$f_{t_{ijd}} = \frac{e^{\left(\frac{H_{5\%,f}}{H_s}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}}{0,05}$$

Tenslotte worden de belastingduren van alle tijdstappen bij elkaar opgeteld.

Doordat gerekend wordt met de factor  $f_{H_s,bezwijk}$ , welke niet symmetrisch is ten opzichte van  $t = 0$  uur, kan in Steentoets2008.e niet gerekend worden met formules voor het waterstandsverloop uit STEENTOETS2008. De waterstandsverloopformules uit Steentoets2008.a zijn daarom gebruikt in combinatie met een faseverschil van  $t_{fase} = 0$  uur (paragraaf 4.1.3.1). In Steentoets2008.e is tevens dezelfde aanpassing aangebracht met betrekking tot de tijdstapgrootte als in Steentoets2008.a (zie paragraaf 4.1.3.1).

De rekenstructuur van het programma is op diverse punten gewijzigd. In STEENTOETS2008 werd een begintijdstip en een eindtijdstip berekend van elk tijdsinterval, dat binnen de relevante waterstandrange valt. Die afzonderlijke belastingduurperiodes werden vervolgens bij elkaar opgeteld om de totale belastingduur te berekenen. In Steentoets2008.e is deze methode gewijzigd in een procedure waarin over alle tijdstappen de tijd die effectief bijdraagt aan de belastingduur wordt opgeteld.

#### 4.5.3 Werkwijze

Door middel van het berekenen van case e is geschat hoe groot de invloed is op de belastingduur en de stabiliteit van een steenzetting, als gevolg van het rekenen met een golfsteilheid, die afneemt in de tijd. Ten behoeve van de case zijn de formules en de

rekenstructuur van STEENTOETS2008 vervangen door de formules en de rekenstructuur, zoals beschreven in paragraaf 4.5.2.

In Steentoets2008.e zijn twee type steenzettingen ingevoerd: een betonzuilensteenzetting en een blokkensteenzetting. Voor beide steenzettingen is berekend hoe groot de waarden zijn voor de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{belast}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$  [-]. Daarbij werd per type steenzetting gevarieerd in het niveau van de bovenste overgangsconstructie ( $Z_b$ ) van  $Z_b = NAP+5,5m$  tot  $Z_b = NAP+0,0m$ . De waarden  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$  zijn per type steenzetting zowel in STEENTOETS2008 als in Steentoets2008.e berekend voor vier verschillende getijdenranges.

#### 4.5.4 Resultaten

Tabel 4.9 geeft de belangrijkste resultaten van case e. In de tabel wordt per steenzetting en per getijdenrange weergegeven voor welk niveau van de bovenste overgangsconstructie  $Z_b$  het verschil tussen de resultaten van STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e het grootst is. Voor de  $Z_b$  waarbij het verschil maximaal is, worden de bijbehorende waarden voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$  gegeven. De kolommen 'ST' en 'St.e' geven de resultaten, zoals die door respectievelijk STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e zijn berekend.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e										
Steenzett.	Getijdenrange [m, NAP+]	Waarden t.p.v. maximaal verschil tussen ST.2008 en St.2008.e								
		Maatg. waterstand			Belastingduur			Stabiliteitsgetal		
		$Z_b$ [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]		$Z_b$ [m, NAP+]	$t_{belast}$ [uur]		$Z_b$ [m, NAP+]	$f_{gt}$ [-]	
			ST	St.e		ST	St.e		ST	St.e
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	1,0	2,25	1,55	1,0	10,4	4,8	1,0	40,33	3,47
	-1,00 tot 1,00	2,0	2,40	2,75	2,0	7,4	3,0	4,5	1,05	1,82
	-1,50 tot 1,50	3,0	3,85	4,05	3,0	4,4	5,0	5,5	3,03	3,81
	-2,00 tot 2,00	1,0	2,25	1,55	2,5	4,6	2,3	1,0	40,33	2,91
Blokken	-0,50 tot 0,50	3,5	5,00	4,65	1,0	5,1	7,2	3,5	0,65	0,41
	-1,00 tot 1,00	3,5	5,00	4,60	1,0	12,9	14,1	1,5	0,51	0,68
	-1,50 tot 1,50	3,5	5,00	4,60	1,0	7,6	8,5	3,5	0,79	0,62
	-2,00 tot 2,00	2,5	4,00	2,80	2,5	2,2	6,1	3,5	0,83	0,66

Tabel 4.9 Resultaten 'Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd'.

Bijlagen E.1 en E.2 geven het volledige overzicht van de resultaten van case e. Wat betreft de maatgevende waterstand en de belastingduur zijn bij de betonzuilen- en de blokkensteenzetting in hoofdlijnen dezelfde trends zichtbaar. Naarmate het niveau van de bovenste overgangsconstructie  $Z_b$  lager ligt, wordt de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  lager. Zowel wat betreft de maatgevende waterstand als de belastingduur zijn er nauwelijks verschillen tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e.

Wat betreft de stabiliteit zijn er enkele verschillen zichtbaar tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e. Hoewel de verschillen gering zijn, ligt de stabiliteit bij de betonzuilensteenzetting over het algemeen in Steentoets2008.e iets hoger dan in STEENTOETS2008. De verschillen zijn het grootst bij hogere waarden voor  $Z_b$ . Bij de blokkensteenzetting is dat tegenovergesteld. Daar geeft Steentoets2008.e over het algemeen een iets lagere stabiliteit dan STEENTOETS2008.

## 4.6 Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd

### 4.6.1 STEENTOETS2008

In STEENTOETS2008 wordt aangenomen dat golven gedurende de hele storm vanuit een constante hoek aanvallen op steenzettingen. Er wordt in de gehele berekening uitgegaan van dezelfde hoek van golfaanval  $\beta$ .

Golven die niet loodrecht op de steenzetting invallen ( $\beta \neq 0^\circ$ ) hebben een kleinere invloed op de steenzettingstabieleit dan golven die wel loodrecht invallen ( $\beta = 0^\circ$ ). Deze invloed wordt in STEENTOETS2008 verdisconteerd door het stijghoogteverschil te vermenigvuldigen met de factor  $f_\beta$ .

$$f_\beta = \max(0, 2; (\max(\cos \beta; 0, 01))^{2/3})$$

### 4.6.2 Aanpassing

In werkelijkheid zal de invalshoek  $\beta$  veranderen naarmate een storm verstrijkt. De baan van lagedrukgebieden in combinatie met de roterende beweging van lucht daaromheen veroorzaakt een veranderende windrichting in de loop van de storm. De hoek van golfaanval  $\beta$  zal verlopen in de tijd. Deze verlopende hoek van golfaanval wordt in Steentoets2008.f verdisconteerd middels het toevoegen van een factor  $f_{\text{golfrichting}}$ .

$$f_{\text{golfrichting}} = \max(0, 2; (\max(\cos \beta_{\text{var}}; 0, 01))^{2/3})$$

Daarin is  $\beta_{\text{var}}$  de in de tijd verlopende hoek van golfaanval. In deze case wordt uitgegaan van 2 scenario's:

- $\beta_{\text{var}}$  verloopt van  $-40^\circ$  op  $t = -t_{\text{storm}}/2$  tot  $40^\circ$  op  $t = t_{\text{storm}}/2$ .

Voor het interval  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t_i \leq t_{\text{storm}}/2$  uur wordt  $\beta_{\text{var}}$  als functie van  $t_i$  gegeven door de formule:

$$\beta_{\text{var}} = \frac{80}{t_{\text{storm}}} \cdot t_i$$

$t_i$  is daarin steeds het midden tussen de tijdstippen  $t(1)$  en  $t(2)$ :

$$t_i = \frac{t(2) + t(1)}{2}$$

- $\beta_{\text{var}}$  verloopt van  $0^\circ$  op  $t = -t_{\text{storm}}/2$  tot  $80^\circ$  op  $t = t_{\text{storm}}/2$ .

Voor het interval  $-t_{\text{storm}}/2 \leq t_i \leq t_{\text{storm}}/2$  uur wordt  $\beta_{\text{var}}$  als functie van  $t_i$  gegeven door de formule:

$$\beta_{\text{var}} = \frac{80}{t_{\text{storm}}} \cdot t_i + 40$$



Volgens de Rayleigh-verdeling geldt:

$$\frac{H_{x\%}}{H_s} = \sqrt{\frac{\ln(x)}{\ln(0,135)}}$$

Daarmee wordt onderstaand de golfhoogte berekend, die volgens de Rayleigh-verdeling een overschrijdingspercentage heeft van 5%. De hypothese is dat alleen de golven, groter dan  $H_{5\%}$ , mee zullen tellen bij het al of niet instabiel worden van de steenzetting. In de formule is  $H_s$  de golfhoogte, behorende bij de waterstand, waarmee in STEENTOETS2008 gerekend wordt.

$$H_{5\%} = \sqrt{\frac{\ln(0,05)}{\ln(0,135)}} \cdot H_s$$

De golfhoogte  $H_{5\%}$  zal afnemen naarmate  $\beta_{\text{var}}$  nadert naar  $0^\circ$ . De aangepaste  $H_{5\%}$  wordt als volgt berekend:

$$H_{5\%,f} = \frac{H_{5\%}}{f_{\text{golfrichting}}}$$

Met deze aangepaste  $H_{5\%,f}$  wordt bepaald hoeveel % van de golven groter zal zijn dan  $H_{5\%}$ .

Percentage golven groter dan  $H_{5\%}$  is  $e^{\left(\frac{H_{5\%,f}}{H_s}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}$

Dat percentage wordt vergeleken met 5%. Deze vergelijking levert tenslotte de factor  $f_{\text{tijd}}$  op. De factor bepaalt, evenals in de cases d en e, per tijdstap welk deel van de belastingduur effectief als belastingduur meegeteld mag worden en welk deel niet.

$$f_{\text{tijd}} = \frac{e^{\left(\frac{H_{5\%,f}}{H_s}\right)^2 \cdot \ln(0,135)}}{0,05}$$

Tenslotte worden de belastingduren van alle tijdstappen bij elkaar opgeteld.

Doordat gerekend wordt met de factor  $f_{\text{golfrichting}}$ , welke niet symmetrisch is ten opzichte van  $t = 0$  uur, kan in Steentoets2008.e niet gerekend worden met formules voor het waterstandsverloop uit STEENTOETS2008. De waterstandsverloopformules uit Steentoets2008.a zijn daarom gebruikt in combinatie met een faseverschil van  $t_{\text{fase}} = 0$  uur (paragraaf 4.1.3.1). In Steentoets2008.e is tevens dezelfde aanpassing aangebracht met betrekking tot de tijdstapgrootte als in Steentoets2008.a (zie paragraaf 4.1.3.1).

De rekenstructuur van het programma is op diverse punten gewijzigd. In STEENTOETS2008 werd een begintijdstip en een eindtijdstip berekend van elk belastingduur tijdsinterval, dat binnen de relevante waterstandrange valt. Die afzonderlijke belastingduurperiodes werden vervolgens bij elkaar opgeteld om de totale belastingduur te berekenen. In Steentoets2008.f

is deze methode gewijzigd in een procedure waarin over alle tijdstappen de tijd die effectief bijdraagt aan de belastingduur wordt opgeteld.

#### 4.6.3 Werkwijze

Door middel van het berekenen van case f is geschat hoe groot de invloed is op de belastingduur en de stabiliteit van een steenzetting, als gevolg van een in de tijd veranderende hoek van golfaanval. Ten behoeve van de case is de rekenstructuur van STEENTOETS2008 vervangen door de rekenstructuur, zoals beschreven in paragraaf 4.6.2. Tevens is de factor  $f_{\text{golfrichting}}$  toegevoegd.

Om de invloed van de veranderende golfrichting inzichtelijker te maken, is voor deze case zowel in STEENTOETS2008 als in Steentoets2008.f het criterium verwijderd, waarin gesteld wordt dat de belastingduur een minimale duur heeft van 1000 golven.

In Steentoets2008.f zijn twee type steenzettingen ingevoerd: een betonzuilensteenzetting en een blokkensteenzetting. Voor beide steenzettingen is voor vier verschillende getijdenranges berekend hoe groot de waarden zijn voor de maatgevende waterstand  $h_{\text{MWS}}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{\text{belast}}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{\text{gt}}$  [-]. Daarbij werd per type steenzetting gevarieerd in het niveau van de bovenste overgangsconstructie ( $Z_b$ ) van  $Z_b = \text{NAP}+5,5\text{m}$  tot  $Z_b = \text{NAP}+0,0\text{m}$ .

De waarden  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$  zijn per type steenzetting, zowel in STEENTOETS2008 als in Steentoets2008.f berekend. Wanneer in Steentoets2008.f  $\beta_{\text{var}}$  verloopt van  $-40^\circ$  tot  $40^\circ$  wordt in STEENTOETS2008 ter vergelijking gerekend met  $\beta = 0^\circ$ . Wanneer in Steentoets2008.f  $\beta_{\text{var}}$  verloopt van  $0^\circ$  tot  $80^\circ$  wordt in STEENTOETS2008 gerekend met  $\beta = 40^\circ$ .

#### 4.6.4 Resultaten

Tabel 4.10 geeft de belangrijkste resultaten van case f. In de tabel wordt per steenzetting en per getijdenrange weergegeven voor welk niveau van de bovenste overgangsconstructie  $Z_b$  het verschil tussen de resultaten van STEENTOETS2008 en Steentoets2008.f het grootst is. Voor de  $Z_b$  waarbij het verschil maximaal is, worden de bijbehorende waarden voor  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$  gegeven. De kolommen 'ST' en 'St.f' geven de resultaten, zoals die door respectievelijk STEENTOETS2008 en Steentoets2008.f zijn berekend.

Bijlagen F.1 en F.2 geven het volledige overzicht van de resultaten van case f voor de betonzuilensteenzetting: F.1 voor een verlopende  $\beta_{\text{var}}$  van  $-40^\circ$  tot  $40^\circ$  en F.2 voor een verlopende  $\beta_{\text{var}}$  van  $0^\circ$  tot  $80^\circ$ .

Bijlagen F.3 en F.4 geven het volledige overzicht van de resultaten van case f voor de blokkensteenzetting: F.3 voor een verlopende  $\beta_{\text{var}}$  van  $-40^\circ$  tot  $40^\circ$  en F.4 voor een verlopende  $\beta_{\text{var}}$  van  $0^\circ$  tot  $80^\circ$ .

Bij een verloop van  $\beta_{\text{var}}$  van  $-40^\circ$  tot  $40^\circ$  zijn bij beide steenzettingen de verschillen tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.f gering. In Steentoets2008.f is het verloop van de hoek van golfval symmetrisch ten opzichte van  $\beta = 0^\circ$ , waarbij  $\beta = 0^\circ$  in het midden van de storm. Ook de invloedsfactor voor schuine golfval  $f_{\text{golfrichting}}$  is in Steentoets2008.f symmetrisch ten opzichte van  $\beta = 0^\circ$ . In het midden van de storm (als  $\beta = 0^\circ$ ) is  $f_{\text{golfrichting}} = 1,00$ , waardoor gedurende een relatief lange periode de afzonderlijke tijdsintervallen grotendeels effectief meetellen als belastingduur. Het zwaartepunt van de effectieve belastingduur ligt in Steentoets2008.f bij  $\beta = 0^\circ$ . Doordat ook in STEENTOETS2008 gedurende de hele storm wordt gerekend met  $\beta = 0^\circ$ , en dus met  $f_{\text{golfrichting}} = 1,00$ , zijn de verschillen tussen Steentoets2008.f en STEENTOETS2008 beperkt.

De belastingduur is in Steentoets2008.f iets korter dan in STEENTOETS2008, maar de stabiliteit vertoont vrijwel geen verschillen. Slechts bij lage  $Z_b$ 's wordt bij de blokkensteenzetting door Steentoets2008.f een iets hogere stabiliteit berekend.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.f										
Steenzett.	Getijdenrange [m, NAP+]	Waarden t.p.v. maximaal verschil tussen ST.2008 en St.2008.f								
		Maatg. waterstand			Belastingduur			Stabiliteitsgetal		
		$Z_b$ [m, NAP+]	$h_{MWS}$ [m, NAP+]		$Z_b$ [m, NAP+]	$t_{belast}$ [uur]		$Z_b$ [m, NAP+]	$f_{gt}$ [-]	
			ST	St.f		ST	St.f		ST	St.f
Betonzuilen	$\beta_{var}$ verloopt van $-40^\circ$ tot $40^\circ$									
	-0,50 tot 0,50	1,5	2,10	2,05	1,0	10,4	6,7	1,5	1,42	1,49
	-1,00 tot 1,00	1,5	2,10	1,90	1,0	11,0	8,2	1,5	1,43	1,49
	-1,50 tot 1,50	1,0	1,45	2,25	1,5	10,5	7,2	1,0	1,70	40,33
	-2,00 tot 2,00	2,0	2,65	2,60	2,0	7,2	5,0	2,0	1,34	1,49
	$\beta_{var}$ verloopt van $0^\circ$ tot $80^\circ$									
	-0,50 tot 0,50	2,0	2,60	2,40	1,5	13,1	5,2	0,0	71,86	60,16
	-1,00 tot 1,00	2,0	2,55	2,40	1,0	16,2	6,5	0,0	71,86	60,16
	-1,50 tot 1,50	1,5	2,95	2,00	0,5	10,0	3,8	1,5	41,36	1,65
	-2,00 tot 2,00	1,5	2,95	2,00	1,5	9,9	2,9	1,5	41,36	1,73
Blokken	$\beta_{var}$ verloopt van $-40^\circ$ tot $40^\circ$									
	-0,50 tot 0,50	1,0	2,10	2,00	1,5	13,7	10,3	0,0	1,34	1,71
	-1,00 tot 1,00	0,5	1,35	1,25	1,5	12,9	9,4	0,0	1,56	1,90
	-1,50 tot 1,50	2,0	3,45	3,40	1,5	10,6	7,2	0,0	1,60	1,94
	-2,00 tot 2,00	1,0	2,10	2,05	1,5	8,3	5,0	0,0	1,11	1,25
	$\beta_{var}$ verloopt van $0^\circ$ tot $80^\circ$									
	-0,50 tot 0,50	5,5	4,20	2,20	1,5	13,7	5,2	2,0	0,77	1,11
	-1,00 tot 1,00	2,5	4,05	2,05	1,0	12,9	4,7	1,5	0,84	0,63
	-1,50 tot 1,50	2,5	4,00	2,00	1,5	10,6	4,4	2,5	0,97	1,16
	-2,00 tot 2,00	4,0	5,00	2,30	1,5	8,3	2,9	2,5	0,99	1,16

Tabel 4.10

Resultaten 'Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd'.

Bij een verloop van  $\beta_{var}$  van  $0^\circ$  tot  $80^\circ$  zijn bij beide steenzettingen de verschillen tussen de stabiliteit in STEENTOETS2008 en Steentoets2008.f groter. In Steentoets2008.f is het verloop van de hoek van golfval symmetrisch ten opzichte van  $\beta = 40^\circ$ , waarbij  $\beta = 40^\circ$  in het midden van de storm. De invloedsfactor voor schuine golfval  $f_{golfrichting}$  is in Steentoets2008.f daarentegen niet symmetrisch ten opzichte van  $\beta = 40^\circ$ . Aan het begin van de storm (als  $\beta = 0^\circ$ ) is  $f_{golfrichting} = 1,00$ . In het midden van de storm (als  $\beta = 40^\circ$ ) is  $f_{golfrichting} = 0,84$ . Aan het einde van de storm (als  $\beta = 80^\circ$ ) is  $f_{golfrichting} = 0,31$ . Doordat  $f_{golfrichting}$  vanaf het begin van de storm afneemt, ligt in Steentoets2008.f het zwaartepunt van de effectieve belastingduur niet bij  $\beta = 40^\circ$ , maar bij een kleinere hoek ( $\beta < 40^\circ$ ). Aangezien in de referentieberekening in STEENTOETS2008 gedurende de hele storm wel wordt gerekend met  $\beta = 40^\circ$ , zijn verschillen zichtbaar tussen de resultaten van Steentoets2008.f en STEENTOETS2008.

Bij de betonzuilensteenzetting ligt de  $f_{gt}$ -waarde in Steentoets2008.f over het algemeen circa 0,10 tot 0,20 lager dan in STEENTOETS2008, met uitzondering van rond de grens tussen 'niet belast' en 'weinig klemming' en rond de grens tussen 'weinig klemming' en 'niet belast'

(bijlagen F.2). Bij de blokkensteenzetting is de  $f_{gt}$ -waarde voor  $Z_b$ 's tussen NAP+1,5m en NAP+3,5m in Steentoets2008.f circa 0,10 tot 0,30 hoger dan in STEENTOETS2008. Voor de overige niveaus van de bovenste overgangconstructie is de stabiliteit vrijwel gelijk.

## 4.7 Case g: Variërende stormduur

### 4.7.1 STEENTOETS2008

In de VTV is voor de verschillende watersystemen in Nederland vastgesteld voor welke stormduur de steenzettingen getoetst moeten worden. Een overzicht van de te gebruiken stormduren is weergegeven in Tabel 2.1. Conform de VTV wordt in STEENTOETS2008 met deze duren gerekend.

### 4.7.2 Aanpassing

Over het algemeen zal een langere belastingduur gevonden worden, wanneer gerekend wordt met een langere stormduur. Ten behoeve van case g is de stormduur in STEENTOETS2008 eenvoudig te variëren door in het tabblad 'Algemeen' bij de algemene instellingen en waarden achter 'Gebied' te kiezen voor 'Anders' en vervolgens achter 'Stormduur [uur]' de gewenste stormduur in te voeren.

### 4.7.3 Werkwijze

Om de invloed van een variërende stormduur,  $t_{storm}$ , te onderzoeken, is in STEENTOETS2008 een betonzuilensteenzetting ingevoerd met een bovengrens op NAP+5,5m en een ondergrens op NAP-5,0m. De stabiliteit van deze steenzetting werd achtereenvolgens berekend voor  $10 \text{ uur} \leq t_{storm} \leq 120 \text{ uur}$ , met een stapgrootte van 5 uur. Voor de verschillende stormduren zijn de maatgevende waterstand  $h_{MWS}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{belast}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{gt}$  [-] bepaald. Dit werd gedaan voor vier verschillende getijdenranges. Steeds werd gerekend met een toetspeil op NAP+5,0m.

### 4.7.4 Resultaten

Tabel 4.11 geeft de belangrijkste resultaten van case g. In de tabel wordt per getijdenrange weergegeven wat de waarden zijn voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ . De kolommen ST.2008 geven de waarden zoals die door STEENTOETS2008 berekend worden. In overeenstemming met de andere cases is ervoor gekozen om in de kolommen ST.2008 de waarden weer te geven, welke horen bij  $t_{storm} = 35$  uur. Dit is van toepassing op de meeste Nederlandse watersystemen. De kolommen 'St.2008.g' geven per getijdenrange de minimale en maximale waarden voor  $h_{MWS}$ ,  $t_{belast}$  en  $f_{gt}$ , zoals die door Steentoets2008.g zijn berekend voor de handmatig ingevoerde stormduren ( $10 \text{ uur} \leq t_{storm} \leq 120 \text{ uur}$ ).

Bijlage G.1 geeft een volledig overzicht van de resultaten van case g. De maatgevende waterstand, de belastingduur en de stabiliteit blijven vrijwel gelijk bij stormen met een stormduur tot ongeveer 85 uur. Pas bij een storm met een langere duur treden veranderingen op. De maatgevende waterstand neemt af van circa NAP+4,6m à NAP+5,0m tot ongeveer NAP+4,0m. De belastingduur neemt toe van 1,8 à 4,1 uur tot 8,2 à 18,5 uur. Als gevolg daarvan neemt vanaf  $t_{storm} = 85$  uur de stabiliteit geleidelijk af.

Resultaten STEENTOETS2008 en Steentoets2008.g										
Steenzetting	Getijdenrange [m, NAP+]	h <sub>MWS</sub> [m, NAP+]			t <sub>belast</sub> [uur]			f <sub>gt</sub> [-]		
		ST.2008	St.2008.g		ST.2008	St.2008.g		ST.2008	St.2008.g	
			min	max		min	max		min	max
Betonzuilen	-0,50 tot 0,50	4,75	3,85	4,75	4,1	4,0	18,5	2,57	2,16	2,58
	-1,00 tot 1,00	4,60	3,90	4,60	3,6	3,6	11,0	2,97	2,52	2,97
	-1,50 tot 1,50	5,00	4,00	5,00	1,8	1,8	8,9	3,03	2,64	3,03
	-2,00 tot 2,00	5,00	4,05	5,00	1,8	1,8	8,2	3,03	2,73	3,03

Tabel 4.11 Resultaten 'Case g: Variërende stormduur'.

De verschillen vanaf  $t_{\text{storm}} = 85$  uur worden verklaard door de combinatie van het waterstandsverloop en de relevante waterstandrange. Tot  $t_{\text{storm}} = 85$  uur valt uitsluitend de middelste top van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange. Daardoor blijven  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$  in dat tijdinterval vrijwel gelijk. Na  $t_{\text{storm}} = 85$  uur vallen ook de twee aangrenzende lagere toppen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange. Daardoor wordt de belastingduur langer, daalt de maatgevende waterstand en daalt eveneens de stabiliteit.

De kritieke waarde van  $t_{\text{storm}}$ , waarboven de stabiliteit gaat teruglopen, zal bij een lager toetspeil bij een kortere stormduur liggen dan de 85 uur, die in deze case is berekend.

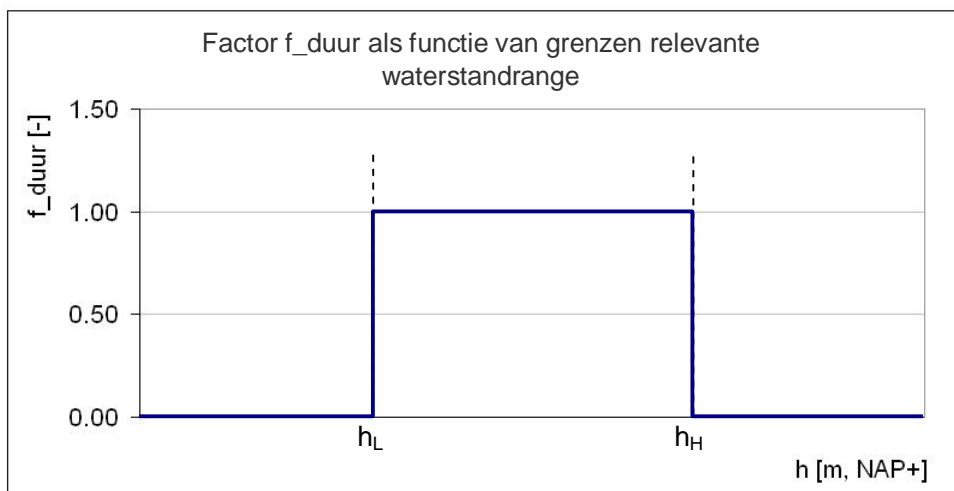
#### 4.8 Case h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken

##### 4.8.1 STEENTOETS2008

In STEENTOETS2008 wordt de belastingduur berekend door de tijdsintervallen te sommeren, waarvoor geldt dat de waterstandsverloopcurve binnen de relevante waterstandrange valt. In STEENTOETS2008 leveren de grenzen van de relevante waterstandrange in feite een discontinuïteit (zie linker deel van Figuur 3.5). Wanneer een top van het waterstandsverloop net binnen de range valt, draagt dat tijdsinterval volledig bij aan de belastingduur. Maar wanneer een top daarentegen net onder de range blijft, telt die in het geheel niet mee. Geringe verschillen in het waterstandsverloop kunnen daardoor aanzienlijke verschillen opleveren in de belastingduur.

Figuur 4.12 geeft een factor  $f_{\text{duur}}$  voor een scherp begrensde relevante waterstandrange. Voor  $h_L \leq h \leq h_H$  is  $f_{\text{duur}} = 1$  en tellen de tijdsintervallen volledig mee. Voor  $h < h_L$  en  $h > h_H$  is  $f_{\text{duur}} = 0$  en tellen de tijdsintervallen in het geheel niet mee.

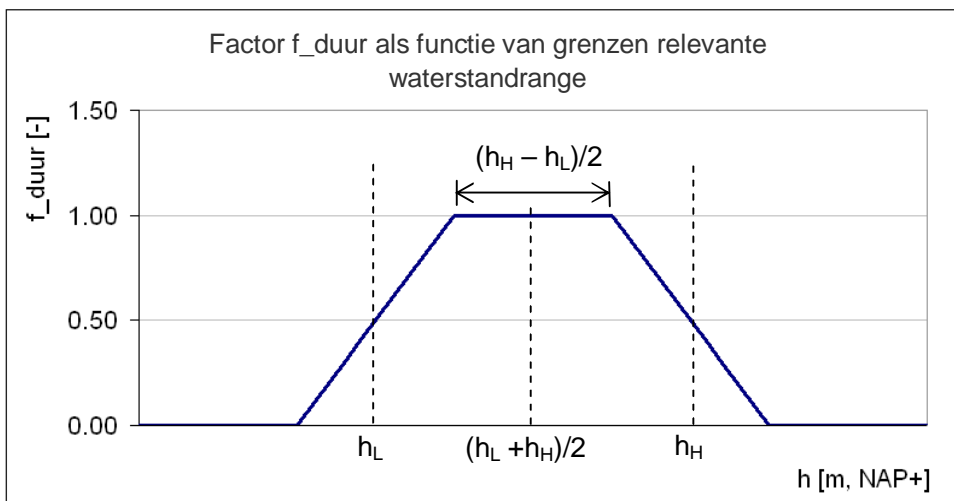
In de rekenstructuur van STEENTOETS2008 wordt weliswaar niet gerekend met factor  $f_{\text{duur}}$ , maar ten behoeve van de aanpassingen in deze case wordt de rekenmethode aangepast aan een methode, waarin wel gerekend wordt met factor  $f_{\text{duur}}$ .



Figuur 4.12 Discontinue grenzen relevante waterstandrange in STEENTOETS2008.

4.8.2 Aanpassing

In werkelijkheid zijn de grenzen van de relevante waterstandrange niet zo scherp begrensd als weergegeven in Figuur 4.12. Het is realistischer om de grenzen van de relevante waterstandrange geleidelijker te laten verlopen (zie rechter deel van Figuur 3.5). Het deel van de waterstandsverloopcurve, dat in het midden van de range valt, telt volledig mee. Maar naar de grenzen van de waterstandrange toe, zal de bijdrage afnemen. De factor  $f_{duur}$  wordt daartoe gewijzigd in een functie, zoals weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.13 Grenzen relevante waterstandrange in Steentoets2008.h.

De factor  $f_{duur}$  wordt geschreven als functie van  $h$ ,  $h_L$ ,  $h_H$  en  $R_c$ . De richtingscoëfficiënt  $R_c$  geeft de steilheid van  $f_{duur}$  voor  $0 < f_{duur} < 1$ .  $R_c$  wordt gegeven als functie van  $h_L$  en  $h_H$ . Er is voor gekozen de middelste helft van de relevante waterstandrange volledig mee te laten tellen.

$$R_c = \frac{2}{h_H - h_L}$$

Ter plaatse van de ondergrens  $h_L$  en de bovengrens  $h_H$  is de factor gesteld op  $f_{\text{duur,grens}} = 0,5$ . Het oppervlak onder de grafiek van  $f_{\text{duur}}$  is daardoor in Steentoets2008.h gelijk is aan het oppervlak in STEENTOETS2008.

De factor  $f_{\text{duur}}$  wordt gegeven door de volgende formules:

Als  $h < \frac{h_H + h_L}{2}$ , dan:

$$f_{\text{duur}} = \max(0; \min(Rc \cdot (h - h_L) + f_{\text{duur,grens}}; 1))$$

Als  $h \geq \frac{h_H + h_L}{2}$ , dan:

$$f_{\text{duur}} = \max(0; \min(-Rc \cdot (h - h_H) + f_{\text{duur,grens}}; 1))$$

De totale belastingduur wordt tenslotte bepaald door de afzonderlijke tijdsintervallen bij elkaar op te tellen.

Waar in STEENTOETS2008 gerekend wordt met een tijdstapgrootte  $dt = 1,0$  uur, is het in Steentoets2008.h noodzakelijk te rekenen met een kleinere tijdstapgrootte:  $dt = 0,2$  uur.

De structuur van het programma is gewijzigd. In STEENTOETS2008 wordt middels de 'labels' A, B en C per tijdstap bepaald hoe groot de afzonderlijke tijdsintervallen zijn, die bijdragen aan de belastingduur (zie paragraaf 5.7 van Klein Breteler (2009)). In Steentoets2008.h zijn de labels A, B en C vervangen door de aanpassingen, zoals beschreven in deze paragraaf. De overzichtelijkheid van de rekenstructuur van Steentoets wordt daardoor aanzienlijk vergroot.

Om de generieke toepasbaarheid van deze aanpassing te vergroten, zijn in Steentoets2008.h de waterstandsverloopformules van STEENTOETS2008 vervangen door de formules zoals die zijn beschreven in paragraaf 4.1.3.1. Door die extra aanpassing is het mogelijk om te rekenen met asymmetrische waterstandsverlopen.

#### 4.8.3 Werkwijze

Om de invloed van de diffuse grenzen te onderzoeken, worden de cases e (blokken) en f (blokken, met  $\beta_{\text{var}}$  van  $0^\circ$  tot  $80^\circ$ ) nogmaals doorgerekend met Steentoets2008.h. De grafieken van de cases e (bijlage E.2) en f (bijlage F.4) vertonen fluctuaties, die mogelijk veroorzaakt worden doordat toppen van het waterstandsverloop net binnen of buiten de relevante waterstandrange vallen. Beide cases worden doorgerekend voor een blokkensteenzetting met een variërend niveau van de bovenste overgangsconstructie ( $Z_b$ ) van  $Z_b = \text{NAP}+5,5\text{m}$  tot  $Z_b = \text{NAP}+0,0\text{m}$ .

Voor beide cases zijn de maatgevende waterstand  $h_{\text{MWS}}$  [m, NAP+], de belastingduur  $t_{\text{belast}}$  [uur] en het stabiliteitsgetal  $f_{\text{gt}}$  [-] bepaald. Dit werd gedaan voor vier verschillende getijdenranges. In alle gevallen werd gerekend met een toetspeil op NAP+5,0m.

#### 4.8.4 Resultaten

Bijlage H.1 geeft de resultaten weer van de cases e en h. Bijlage H.2 geeft de resultaten van de cases f en h. De resultaten verschillen niet veel van elkaar, maar over het algemeen zijn de fluctuaties van de grafieken in case h kleiner dan in de cases e en f.

Door te rekenen met diffuse grenzen van de relevante waterstandrange worden de uitkomsten van Steentoets realistischer. Geringe variaties in de geometrie van een steenzetting of in de hydraulische parameters, kunnen in STEENTOETS2008 onterecht resultaatverschillen opleveren. Dit kan tot verwarring leiden bij de gebruikers van STEENTOETS2008.

De betrouwbaarheid van het programma wordt vergroot en de interpretatie van de resultaten wordt eenvoudiger wanneer gerekend wordt met diffuse grenzen van de relevante waterstandrange.



## 5 Analyse van de resultaten

De belastingduur wordt in STEENTOETS2008 berekend, uitgaande van een schematisatie. Aan die schematisatie kunnen diverse aanpassingen worden aangebracht om de berekening meer aan te laten sluiten op de werkelijkheid. De mogelijke aanpassingen zijn in hoofdlijnen beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de aanpassingen uitgewerkt en is middels cases onderzocht hoe groot de invloed van elke afzonderlijke aanpassing is op de belastingduur en de stabiliteit van steenzettingen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten en, waar relevant, van de relatie tussen de diverse cases.

### 5.1 Case a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater

#### 5.1.1 Case a.1

In case a.1 werd gerekend met een waterstandsverloop, uitgaande van een vaste stormopzet. De stormopzet blijft in dat geval onveranderd en de getijdenkromme slingert daar omheen (Figuur 3.1). Bij een faseverschil van 0 uur valt dan de middelste top van het waterstandsverloop gelijk met het toetspeil. Bij de overige faseverschillen vallen alle topwaterstanden onder het toetspeil. Merk op dat dit type waterstandsverloop niet geheel aansluit op de methode waarmee het toetspeil in het verleden is vastgesteld (paragraaf 3.1). Binnen de beschouwde range faseverschillen neemt bij een toenemend faseverschil de maatgevende waterstand relatief sterk af en de belastingduur wordt maximaal circa 3 keer zo lang (bijlage A.1). Dit wordt veroorzaakt doordat meerdere toppen en/of dalen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange vallen. De stabiliteit is voor alle getijdenranges hoger:  $f_{gt}$  neemt minimaal toe van 2,57 tot 3,17 en maximaal van 3,03 tot 4,37. De toename blijft echter beperkt door twee tegengestelde invloeden:

- de stabiliteit neemt af door een langere belastingduur.
- de stabiliteit neemt toe door een lagere maatgevende waterstand, waardoor met een kleinere golfhoogte gerekend wordt.

De stabiliteit is voor alle getijdenranges het laagst bij een faseverschil van 0 uur. Dat is het faseverschil waarmee STEENTOETS2008 rekent. STEENTOETS2008 geeft dus reeds de maatgevende waarden.

Hoewel de invloed op de stabiliteit in case a.1 beperkt is, kan de invloed in andere gevallen wat groter zijn. De invloed op de stabiliteit is bijvoorbeeld ook afhankelijk van de snelheid waarmee de golfhoogte en golfperiode afnemen als functie van de waterstand. Dat kan variëren per locatie. Hoe kleiner deze afnamesnelheid, des te groter is de invloed van de faseverschuiving op de stabiliteit. Zie bijlagen I.1 en I.2 voor het verloop van  $H_s$  en  $T_p$  waarmee gerekend is. In case a.1 is met een voor Nederland ongeveer gemiddelde afnamesnelheid gerekend, waardoor de invloed een vrij realistische waarde heeft. Maar deze afnamesnelheid is bijvoorbeeld in de Oosterschelde wat kleiner, waardoor daar een wat grotere invloed van de faseverschuiving te verwachten is.

Het doorvoeren van deze aanpassing is gecompliceerd en de rekentijd van het programma neemt relatief veel toe, doordat het hele rekenproces voor elk faseverschil opnieuw doorlopen moet worden. In combinatie met het gegeven dat STEENTOETS2008 in dit specifieke geval (opzet blijft constant bij elk faseverschil) reeds met de maatgevende situatie rekent, wordt aanbevolen Steentoets hiervoor niet aan te passen.

### 5.1.2 Case a.2

In case a.2 werd gerekend met een waterstandsverloop, uitgaande van een variërende stormopzet. De stormopzet varieert zodanig, dat steeds minimaal één top van het waterstandsverloop gelijk valt met het toetspeil. Bij een faseverschil van een halve getijdenperiode vallen zelfs twee toppen van het waterstandsverloop gelijk met het toetspeil (Figuur 3.2). In tegenstelling tot case a.1 komt dit type waterstandsverloop wel overeen met de methode waarmee in het verleden het toetspeil is vastgesteld.

In deze case worden uitsluitend de resultaten beschouwd, behorende bij faseverschillen van 0 tot 4 uur. Het is niet realistisch te rekenen met grotere faseverschillen, omdat dan gerekend wordt met een maximale stormopzet, behorende bij een onrealistisch hoge normfrequentie (zie paragraaf 4.1.4.3).

Hoewel de maatgevende waterstand en de belastingduur enigszins toe- of afnemen, verandert de stabiliteit van de steenzetting binnen de beschouwde range faseverschillen vrijwel niet (bijlage A.2). In combinatie met de gecompliceerdheid van de aanpassing en een toenemende rekentijd, wordt daarom aanbevolen deze aanpassing niet in Steentoets door te voeren.

### 5.1.3 Case a.3

In case a.3 werd gerekend met een 'omhullende' belastingduur. Deze omhullende geeft voor elk niveau op het talud een benadering van de maximale belastingduur over alle faseverschillen.

De invloed van deze aanpassing is geschat voor golven met diverse waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$ . Omdat case a.3 is gebaseerd op het waterstandsverloop van case a.2, worden de resultaten van case a.3 vergeleken met die van case a.2. In overeenstemming met case a.2 worden uitsluitend de resultaten beschouwd, behorende bij faseverschillen van 0 tot 4 uur.

Zowel de maatgevende waterstand, de belastingduur als de  $f_{gt}$ -waarde laten een wispelturig verloop zien ten opzichte van case a.2 (zie bijlagen A.3.2 t/m A.3.5). Vooral de belastingduur en de  $f_{gt}$ -waarden liggen soms hoger, soms lager en soms zelfs tegengesteld ten opzichte van case a.2. De toe- en afnemende stabiliteit is omgerekend naar toe- en afnemende blokdiktes (Tabel 4.5). Bij geringe waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$  in combinatie met een geringe getijdenrange kan volstaan worden met een circa 2 cm kleinere blokdikte (= 7%). Dit kan van toepassing zijn in bijvoorbeeld de Waddenzee. Op locaties met grotere waarden voor  $H_s \cdot \xi_{op}$  in combinatie met een grotere getijdenrange zal de blokdikte veelal vergroot moeten worden met circa 3 à 4 centimeter (= 10 à 13%). Dit zal vooral van toepassing zijn op watersystemen als de Westerschelde.

Vanwege de gecompliceerdheid van de aanpassing en de wispelturige resultaten wordt aanbevolen de opzet van case a.3 niet in Steentoets door te voeren.

## 5.2 Case b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden

Als gevolg van een afnemende topwaterstand neemt de belastingduur in het meest extreme geval toe van 2,2 uur tot 17,3 uur bij een getijdenrange van 1,0 m (bijlage B.1). Dat is een toename van circa 8 maal. De invloed op de belastingduur is bij geringe getijdenranges zeer groot. Bij grotere getijdenranges is de invloed minder groot.

Doordat de maatgevende waterstand voor de diverse topwaterstanden niet veel verandert, is de grote invloed op de belastingduur eveneens merkbaar bij de stabiliteit. Over het algemeen neemt de  $f_{gt}$ -waarde het meest af bij kleinere getijdenranges en lage topwaterstanden. Bij een

getijdenrange van 1,0 m en een topwaterstand van NAP+1,0m neemt de  $f_{gt}$ -waarde af van 1,34 naar 0,82.

Een bijzonder geval wordt gevonden bij een getijdenrange van 3,0 m. Bij een hoge topwaterstand van NAP+5,0m ligt de stabiliteit zeer hoog:  $f_{gt} = 10,99$ . Bij topwaterstanden onder NAP+4,0m ligt de  $f_{gt}$ -waarde aanzienlijk lager: circa 1,15. Doordat bij het toetsen van dijken veelal gerekend wordt met een topwaterstand rond NAP+5,0m kan STEENTOETS2008 bij lagere steenzettingen een veel te gunstig resultaat geven.

Sterke afnamen van de stabiliteit als gevolg van case b zullen overigens beperkt worden, wanneer case b wordt gecombineerd met case d (verloop golfhoogte met waterstand). Wanneer bijvoorbeeld in case b bij een lage topwaterstand alle drie de toppen van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange vallen, levert dat bij de afzonderlijke beschouwing van case b een lange belastingduur op. Echter, in werkelijkheid draagt niet elke top volledig effectief bij aan de totale belastingduur, omdat  $H_s$  bij de eerste en derde top aanzienlijk kleiner is (zie case d: paragraaf 4.4.2). Door case b te combineren met case d zullen de buitenste toppen slechts gedeeltelijk meetellen. Grote afnamen van de stabiliteit van lagere steenzettingen, als gevolg van case b, worden door de combinatie met case d in een bepaalde mate beperkt.

De aanpassing van case b is belangrijk en het wordt aanbevolen de aanpassing in Steentoets te verwerken. De rekentijd van Steentoets zal echter behoorlijk toenemen, wanneer het hele rekenproces voor vele topwaterstanden steeds opnieuw doorgerekend moet worden, in plaats van 1 maal. Om de toename van de rekentijd te beperken, kan volstaan worden met het berekenen van twee situaties:

Standaard berekening, waarbij de topwaterstand gelijk is aan het toetspeil.

Berekening bij een topwaterstand, lager dan het toetspeil. Het stabiliteitsgetal blijft immers vrij constant voor een range van lagere topwaterstanden.

Voor de berekening bij de lagere topwaterstand wordt aanbevolen een formule te ontwikkelen, die een indicatie geeft bij welke waterstand die toetsing het best plaats kan vinden. Met die formule moet de geschikte topwaterstand bepaald kunnen worden op basis van het niveau van de bovenste overgangsconstructie ( $Z_b$ ), het toetspeil ( $h_{toets}$ ) en de getijdenrange ( $R_{rij}$ ). Doordat het stabiliteitsgetal vrijwel constant blijft bij een range van lagere topwaterstanden, kan in deze formule volstaan worden met het geven van een benadering.

### 5.3 Case c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen

De resultaten van de berekeningen laten zien wat de invloed is van een verkeerd gekozen belastinglocatie op de belastingduur en stabiliteit.

Voor de ingevoerde steenzettingen geldt voor de meeste belastinglocaties dat de maatgevende waterstand en de belastingduur vrijwel gelijk is (bijlagen C.1 en C.2). Alleen bij de blokkensteenzetting wordt bij belastinglocatie 4 (hoog front) een iets hogere maatgevende waterstand gevonden en bij de betonzuilensteenzetting wordt bij belastinglocatie 4 een langere belastingduur gevonden.

De stabiliteit van de steenzettingen varieert sterker (bijlage C.3). Bij de betonzuilensteenzetting neemt de stabiliteit in Steentoets2008.c af ten opzichte van STEENTOETS2008 bij de belastinglocaties 1, 4 en 5. Vooral de afname bij locatie 4 is significant (bijvoorbeeld van  $f_{gt} = 2,97$  naar 1,88). Bij de blokkensteenzetting wordt eveneens bij locatie 4 een lichte afname geconstateerd.

Zowel de blokken- als de betonzuilensteenzetting heeft een leklengte  $\Lambda < 1,5$  m. Volgens STEENTOETS2008 zal bij een dergelijke leklengte het maximale stijghoogteverschil optreden tussen de belastinglocaties 1 en 2 (golfklap), maar als voor het berekenen van de belastingduur toch gebruikgemaakt wordt van belastinglocatie 4 (hoog front), geeft dat de laagste stabiliteit. Dit is vooral het geval bij betonzuilensteenzettingen.

Deze invloed is bij hooggelegen steenzettingen wellicht niet erg relevant, omdat belastinglocatie 4 hoort bij een hoog stijghoogtefront, dat voor de stabiliteit van hooggelegen steenzettingen niet maatgevend is. Bij laaggelegen steenzettingen (lage bovenste overgangsconstructie) kan het daarentegen wel relevant zijn, omdat denkbaar is dat belastinglocatie 4 de enige is die de steenzetting belast. De golfklappen (locatie 1 en 2) vallen dan op het talud boven de te toetsen steenzetting.

Bij het interpreteren van de resultaten van deze case is enige voorzichtigheid geboden (zie paragraaf 4.3.4). In Steentoets wordt op twee plaatsen in het rekenproces bepaald op welke locatie het maximale stijghoogteverschil optreedt. De eerste keer wordt een globale schatting gemaakt waarmee de belastingduur berekend kan worden. De tweede keer wordt de locatie nauwkeurig berekend, waarna de stabiliteit berekend wordt. In deze case wordt als gevolg van de aanpassing steeds uitsluitend de eerste schatting overruled. Hoewel Steentoets2008.c daardoor aan het begin van het rekenproces uitgaat van de handmatig overruledde belastinglocatie, is het mogelijk dat Steentoets2008.c na de tweede nauwkeurige locatieberekening alsnog verder rekent met de zelf berekende locatie. In de tabellen en figuren wordt steeds gerefereerd naar de ingestelde belastinglocatie bij het berekenen van de belastingduur (het eerste gebruik van de belastinglocatie).

Het probleem van de onnauwkeurig gekozen belastinglocatie doet zich vooral voor bij een lage overgangsconstructie (waarbij de steenzetting eronder getoetst wordt). Voor het grootste deel is dit probleem eenvoudig op te lossen, door gelijk te controleren of de golfklap op de te toetsen steenzetting valt. Als de golfklap niet op de te toetsen steenzetting valt, maar erboven, moet verder gerekend worden met het hoge stijghoogtefront (belastinglocatie 4). De rekentijd zal daardoor niet significant toenemen. Deze aanpassing wordt aanbevolen.

Tevens wordt aanbevolen te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn van het wijzigen van de volgorde van het rekenproces. Vooralsnog wordt in STEENTOETS2008 eerst op basis van een geschatte belastinglocatie de belastingduur berekend en pas daarna de exacte belastinglocatie. Het nadeel daarvan is dat de relevante waterstandrange wordt bepaald op basis van de geschatte locatie. Het is mogelijk beter om de nauwkeurige berekening van de maximaal belaste locatie op het talud voorin het rekenproces te plaatsen en pas daarna de belastingduur te berekenen.

#### 5.4 Case d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd

Het rekenen met een verlopende golfhoogte heeft een vrij grote invloed op de belastingduur en op de stabiliteit van steenzettingen met een bovenste overgangsconstructie, lager dan circa NAP+3,0m (bijlagen D.1 en D.2). Bij hogere niveaus voor de bovenste overgangsconstructie is de invloed op de stabiliteit zeer gering.

De belastingduur neemt in het meest extreme geval af van 13,7 uur tot 1,5 uur bij  $Z_b = \text{NAP}+1,5\text{m}$ . De grafiek met de  $f_{gr}$ -waarden laat voor de betonzuilensteenzetting een opvallend patroon zien. Bij hoge bovenste overgangsconstructies is de stabiliteit hoog, doordat de klemming in de steenzetting goed is (zie paragraaf 4.4.4). Bij iets lagere bovenste overgangsconstructies, is de stabiliteit het laagst, doordat er niet veel klemming is in combinatie met hoge golven. En bij lage bovenste overgangsconstructies is de stabiliteit weer

(zeer) hoog, doordat de belastingduur korter is, doordat de steenzetting buiten de belaste zone valt en doordat de golven, behorend bij de maatgevende waterstand, gering zijn. Zowel bij de betonzuilen- als de blokkensteenzetting worden vooral bij de lagere bovenste overgangsconstructies significante verschillen gevonden in de stabiliteit tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.d. Als gevolg van de aanpassing neemt de stabiliteit toe.

Hoewel deze afzonderlijke aanpassing tot gevolg heeft dat een waterkering eerder zal worden goedgekeurd, wordt aanbevolen deze aanpassing in Steentoets op te nemen. In combinatie met andere aanpassingen zal het nauwkeurigere resultaten opleveren. Vooral de combinatie van case d met case b wordt als relevant beoordeeld (zie paragraaf 5.2). Afnamen van de stabiliteit, als gevolg van aanpassing b, worden in een bepaalde mate beperkt door ook aanpassing d door te voeren.

Het wordt aanbevolen deze aanpassing in combinatie met aanpassing b in Steentoets op te nemen. Het aanpassen van Steentoets aan een verlopende golfhoogte is relatief eenvoudig, maar het golfhoogteverloop, gedurende een storm, dient nog wel goed vastgesteld te worden. De rekentijd van Steentoets zal als gevolg van deze aanpassing niet significant toenemen.

### **5.5 Case e: Golfsteilheid verloopt met de tijd**

Het rekenen met een verlopende golfsteilheid geeft in de meeste gevallen geen significante verschillen in de belastingduur (bijlagen E.1 en E.2). Wat betreft de stabiliteit zijn er wel enkele verschillen zichtbaar tussen STEENTOETS2008 en Steentoets2008.e. Bij de betonzuilensteenzetting ligt de stabiliteit in Steentoets2008.e over het algemeen iets hoger dan in STEENTOETS2008. Dit is vooral het geval bij hogere bovenste overgangsconstructies. Bij de blokkensteenzetting geeft Steentoets2008.e over het algemeen een iets lagere stabiliteit dan STEENTOETS2008.

Zowel in de cases d als e wordt er naar gestreefd het verloop van de golfparameters gedurende een storm zo realistisch mogelijk te schematiseren. In de cases zijn de verlopende golfhoogte en golfsteilheid afzonderlijk onderzocht, om de afzonderlijke verschillen inzichtelijk te maken. In werkelijkheid zijn golfhoogte en golfsteilheid met elkaar verbonden. Het is dan ook realistischer om de invloeden van de verlopende golfhoogte (bijlagen D.1 en D.2) en de verlopende golfsteilheid (bijlagen E.1 en E.2) gecombineerd te beschouwen.

Het doorvoeren van aanpassing e in Steentoets is echter gecompliceerd. Dit komt doordat de relatie tussen de golfsteilheid en de stabiliteit (zie paragraaf 4.5.2) voor elke situatie opnieuw berekend moet worden. De rekentijd van Steentoets zal als gevolg van deze aanpassing naar verwachting sterk toenemen. Het wordt daarom aanbevolen om de golfsteilheid niet te laten verlopen in de tijd.

Als eenvoudiger alternatief wordt aanbevolen in het hele rekenproces te rekenen met een iets ongunstigere golfperiode. Dit is eenvoudig in Steentoets op te nemen en de rekentijd zal niet significant toenemen.

### **5.6 Case f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd**

Bij een golfinvalshoek, welke verloopt van -40 tot 40 graden (bijlagen F.1 en F.3), blijft de belastingduur bij hogere bovenste overgangsconstructies vrijwel gelijk. Bij lagere bovenste overgangsconstructies berekent Steentoets2008.f veelal een belastingduur die 1 tot 3,5 uur korter is dan in STEENTOETS2008.

De stabiliteit verandert niet bij hoge bovenste overgangsconstructies. Bij lagere bovenste overgangsconstructies geeft Steentoets2008.f een iets hogere stabiliteit dan STEENTOETS2008. Dat is vooral het geval bij de blokkensteenzetting. Merk op dat in deze case zowel in STEENTOETS2008 als Steentoets2008.f het criterium is verwijderd, waarin gesteld wordt dat de belastingduur een minimale duur heeft van 1000 golven. Dit is gedaan om de invloed van de veranderende golfrichting beter zichtbaar te maken.

Bij een golfvalshoek, welke verloopt van 0 tot 80 graden (bijlagen F.2. en F.4), is de belastingduur in Steentoets2008.f in de meeste gevallen aanzienlijk korter dan in STEENTOETS2008. De belastingduur neemt circa 1 tot 10 uur af. In veel gevallen blijft nog slechts circa een derde deel van de belastingduur over.

De stabiliteit neemt bij de betonzuilensteenzetting over het algemeen af met 0,10 tot 0,20. Bij de blokkensteenzetting neemt de stabiliteit bij middelhoge niveaus van de bovenste overgangsconstructie over het algemeen toe met circa 0,10 tot 0,30. Bij hoge en lage niveaus voor de bovenste overgangsconstructie blijft de stabiliteit vrijwel gelijk.

Het doorvoeren van deze aanpassing is niet eenvoudig, doordat kennis over de relatie tussen windrotatie en diverse aspecten als de windsnelheid, windrichting, golfparameters, e.d. nog beperkt is. In combinatie met de geringe invloed, wordt daarom aanbevolen niet te rekenen met een in de tijd verlopende hoek van golfval.

Als alternatieve oplossing wordt wel aanbevolen standaard te rekenen met een bepaalde golfvalshoeksector van bijvoorbeeld 30 graden en daarvan altijd de meest ongunstige hoek te gebruiken. Dit alternatief is minder nauwkeurig, maar het geeft veilige resultaten. Het alternatief is eenvoudig in Steentoets door te voeren en de rekentijd neemt niet toe.

Dit sluit aan op de wijze waarop momenteel de golfcondities berekend worden. De hoek van golfaanval wordt momenteel vrij grof berekend, door uit te gaan van windrichtingsectoren van 30°, en daarmee uiteindelijk de gemiddelde golfrichting te berekenen. Het is dan verstandig om niet met alleen die golfrichting te rekenen, maar ook rekening te houden met het feit dat de golfrichting best wat kan afwijken. Door te stellen dat de golfrichting uit de HR de hoofdrichting is, en daaromheen een range van mogelijke golfrichtingen mogelijk is, doen we recht aan het feit dat de zaak aan het begin ook vrij grof geschematiseerd is met windrichtingsectoren van 30°.

## 5.7 Case g: Variërende stormduur

De maatgevende waterstand, de belastingduur en de stabiliteit blijven vrijwel gelijk bij stormen met een stormduur tot ongeveer 85 uur (bijlage G.1). Pas bij langere stormduren treden veranderingen op. De maatgevende waterstand neemt circa 0,5 m à 1,0 m af. De belastingduur neemt toe met circa 6 à 14 uur. Als gevolg daarvan neemt vanaf  $t_{\text{storm}} = 85$  uur de stabiliteit geleidelijk af.

De verschillen vanaf  $t_{\text{storm}} = 85$  uur worden verklaard door de combinatie van het waterstandsverloop en de relevante waterstandrange. Tot  $t_{\text{storm}} = 85$  uur valt uitsluitend de middelste top van het waterstandsverloop binnen de relevante waterstandrange. Daardoor blijven  $h_{\text{MWS}}$ ,  $t_{\text{belast}}$  en  $f_{\text{gt}}$  in dat tijdinterval vrijwel gelijk. Naarmate een storm langer duurt, wordt de stormopzet minder steil. Daardoor komen de toppen en dalen van het waterstandsverloop steeds hoger te liggen (m.u.v. de top in het midden van de storm). Pas bij een stormduur langer dan 85 uur vallen ook andere toppen dan alleen de middelste top binnen de relevante waterstandrange. De belastingduur wordt daardoor snel langer, lagere waterstanden worden maatgevend en de stabiliteit daalt.

De invloed op de stabiliteit is in deze case pas merkbaar bij stormduren langer dan 85 uur. Dit is veel langer dan de stormduren waarmee conform de HR/VTV gewoonlijk wordt gerekend. Hoewel de invloed op de stabiliteit in combinatie met andere cases weliswaar groter kan zijn, is het niet realistisch om steenzettingen met een dergelijke lange stormduur te toetsen. Het eventueel doorvoeren van deze aanpassing betreft geen aanpassing in de programmering van Steentoets, maar berust op het wijzigen van toetsvoorschriften in de HR/VTV. Het wordt aanbevolen deze aanpassing niet in Steentoets door te voeren.

## 5.8 Case h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken

Om de invloed van diffuse grenzen van de relevante waterstandrange te onderzoeken, werden gedeelten van de cases e en f nogmaals doorgerekend met Steentoets2008.h (bijlagen H.1 en H.2). De grafieken van case e (bijlage E.2) en case f (bijlage F.4) vertonen fluctuaties, die waarschijnlijk veroorzaakt worden doordat toppen van het waterstandsverloop net binnen of buiten de relevante waterstandrange vallen. Slechts geringe verschillen in de geometrie van de steenzetting of in de hydraulische parameters kunnen in STEENTOETS2008 soms onterecht grote resultaatverschillen opleveren.

De verschillen tussen de resultaten van de cases e en h en van f en h zijn gering, maar over het algemeen werden de fluctuaties van de grafieken van de cases e en f kleiner. Hoewel de invloed in dit geval gering is, zorgt het rekenen met meer diffuse grenzen voor meer continue resultaten.

Bij het doorvoeren van deze aanpassing wordt de rekenstructuur van STEENTOETS2008 voor het berekenen van de belastingduur grotendeels vervangen door een nieuwe rekenstructuur. De aanpassing is vrij ingrijpend, maar is reeds vrijwel generiek toepasbaar uitgewerkt ten behoeve van case h. De nieuwe rekenstructuur wordt beduidend korter en overzichtelijker.

Wegens een grotere continuïteit en een eenvoudiger interpretatie van de resultaten en wegens verheldering van de rekenstructuur van Steentoets wordt deze aanpassing aanbevolen. De rekentijd zal naar verwachting niet significant veranderen.





## 6 Conclusies en aanbevelingen

De kennis betreffende de invloed van de belastingduur op de stabiliteit van steenzettingen komt voort uit modelonderzoek, dat is uitgevoerd met een vaste waterstand en gelijke golfcondities. In werkelijkheid zullen de waterstand en golfcondities variëren tijdens een storm. Er is behoefte een brug te slaan tussen de kennis uit dat modelonderzoek met constante omstandigheden, en de praktijk met variërende omstandigheden. De eerste aanzet, die daarvoor is opgezet voor STEENTOETS2008 (Klein Breteler, 2009), kent echter nog een aantal tekortkomingen.

In de onderhavige rapportage is op basis van de huidige theoretische kennis toegewerkt naar een oplossing voor een realistische, maar verantwoorde bepaling van de effectieve belastingduur. In de onderhavige rapportage zijn de tekortkomingen in beeld gebracht en zijn mogelijke aanpassingen beschreven ter verbetering of optimalisatie daarvan. Per afzonderlijke aanpassing is in cases voor specifieke situaties geschat hoe groot de invloed van de aanpassing is op de belastingduur en de stabiliteit van de steenzettingen. Afhankelijk van de resultaten van de cases wordt al dan niet aanbevolen de mogelijke aanpassingen in Steentoets op te nemen. De conclusies van het onderzoek en de aanbevelingen die daaruit volgen, worden in dit hoofdstuk gegeven.

Onderzochte case	Groep	Invloed	Mate van invloed
a: Faseverschuiving	A	Ongunstig	**
b: Lagere topwaterstanden	A	Ongunstig	***
c. 5 Belastinglocaties	B	Ongunstig	*
d. Verlopende golfhoogte	A	Gunstig	***
e. Verlopende golfsteilheid	A	Wisselend	**
f. Verlopende invalshoek	A	Wisselend	**
g: Stormduur	A	Geen tot Ongunstig	*
h: Diffuse grenzen	B	Verminderde gevoeligheid	*

Tabel 6.1 Overzicht van de resultaten (\* = minieme invloed, \*\* = kleine invloed, \*\*\* = matige invloed)

In Tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de resultaten van de doorgerekende cases. Daarbij zijn de cases verdeeld in twee groepen:

- A: cases die betrekking hebben op een wijziging van de hydraulische randvoorwaarden, zoals het verloop van de waterstand, of het verloop van de golfcondities tijdens de storm.
- B: cases die betrekking hebben op mogelijke verbeteringen in de code van het programma Steentoets.

Merk op dat de cases uit groep A weliswaar beter aansluiten bij de fysische realiteit, maar dat dit een wijziging van het Wettelijk Toetsinstrumentarium vereist (HR / VTV). Daardoor wordt voorlopig alleen aanbevolen de wijzigingen uit de groep B in het programma door te voeren.

Vervolgens is in de tabel te vinden of het doorvoeren van de betreffende wijziging gunstig of ongunstig is voor de berekende stabiliteit, en tenslotte is aangegeven of de invloed groot is of niet.

Opgemerkt moet worden dat de conclusies gebaseerd zijn op een specifiek aantal zorgvuldig gekozen cases, waarbij zowel een specifieke steenzetting van zuilen als een met blokken is doorgerekend. Verder is er veel aandacht gegeven aan de grootte van de getijrange omdat die in Zuid Nederland veel groter is dan in Noord Nederland en een behoorlijke invloed heeft. De mate waarin de golfhoogte afneemt bij afnemende waterstand is echter ook een aspect dat invloed heeft. Dat aspect is echter niet apart onderzocht omdat dit de omvang van de studie enorm zou vergroten. Door te rekenen met voor Nederland ongeveer gemiddelde waarden zijn de conclusies desondanks toch goed bruikbaar.

### **6.1 a: Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater**

Case a werd opgedeeld in 3 subcases: a.1 (vaste stormopzet), a.2 (hoogste waterstand gelijk aan toetspeil) en a.3 (rekenen met omhullende belastingduur). Het type waterstandsverloop dat in case a.2 werd gebruikt, sluit aan op de methode waarmee in het verleden het toetspeil is bepaald. Bij het waterstandsverloop van case a.1 is dat niet het geval.

In case a.1 werd bij een toenemend faseverschil een toenemende stabiliteit geconstateerd. STEENTOETS2008 rekt dus reeds met de maatgevende situatie. Het wordt daarom aanbevolen aanpassing a.1 niet in Steentoets door te voeren.

In case a.2 zijn binnen de relevante range faseverschillen (van 0 tot 4 uur, zie paragraaf 4.1.4.3) nauwelijks veranderingen van de stabiliteit zichtbaar. Het wordt aanbevolen aanpassing a.2 niet in Steentoets door te voeren.

In case a.3 werden wisselende resultaten gevonden. De stabiliteit lag in case a.3 soms hoger en soms lager (omgerekend naar blokdiktes betekent dat een toename van -7% tot +13%). Daarom wordt aanbevolen aanpassing a.3 niet in Steentoets door te voeren.

### **6.2 b: Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden**

Bij hoge topwaterstanden verandert de stabiliteit over het algemeen niet significant. Bij lagere topwaterstanden neemt de stabiliteit daarentegen soms sterk af.

Afnamen van de stabiliteit als gevolg van aanpassing b zullen overigens in een bepaalde mate verkleind worden, wanneer aanpassing b wordt gecombineerd met aanpassing d. Het wordt aanbevolen de combinatie van de aanpassingen b en d in Steentoets op te nemen.

Om de extra rekentijd als gevolg van aanpassing b te beperken, wordt aanbevolen de stabiliteit te berekenen bij uitsluitend twee topwaterstanden: bij het toetspeil en bij een lagere waterstand. Er wordt aanbevolen een formule te ontwikkelen, die een benadering geeft van de lagere waterstand waarbij gerekend moet worden.

### **6.3 c: Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen**

De doorgerekende cases geven een indruk van de invloed van een verkeerd gekozen belastinglocatie op de belastingduur en de stabiliteit.

Bij de blokkensteenzetting zijn de verschillen in de stabiliteit vrij gering, maar bij de betonzuilensteenzetting was in een aantal gevallen een afname van de stabiliteit zichtbaar.

Om deze afwijkingen grotendeels te voorkomen, worden de onderstaande twee aanpassingen van het rekenproces aanbevolen:

- Voor het grootste deel is dit probleem eenvoudig op te lossen, door gelijk te controleren of de golfklap op de te toetsen steenzetting valt. Als de golfklap niet op de te toetsen steenzetting valt, maar erboven, moet verder gerekend worden met het hoge

stijghoogtefront (belastinglocatie 4). De rekentijd zal als gevolg van deze aanpassing niet significant toenemen.

- Tevens wordt aanbevolen te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn van het wijzigen van de volgorde van de rekenstructuur van Steentoets. Door het rekenproces van de belastingduur verder naar achteren te verplaatsen binnen het algehele rekenproces, wordt het totale rekenproces nauwkeuriger. Dit heeft geen invloed op de rekentijd.

#### **6.4 d: Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd**

Het rekenen met een verlopende golfhoogte heeft tot gevolg dat bij lagere steenzettingen de stabiliteit soms veel toeneemt. Bij hogere steenzettingen zijn de verschillen gering.

Het wordt aanbevolen aanpassing d in Steentoets op te nemen in combinatie met aanpassing b. Afnamen van de stabiliteit, als gevolg van aanpassing b, worden in een bepaalde mate beperkt door aanpassing d. Het aanpassen van Steentoets aan een verlopende golfhoogte is relatief eenvoudig, maar het golfhoogteverloop gedurende een storm dient nog wel goed vastgesteld te worden. De rekentijd van Steentoets zal als gevolg van deze aanpassing niet significant toenemen.

#### **6.5 e: Golfsteilheid verloopt met de tijd**

Bij de betonzulensteenzetting neemt de stabiliteit bij hoge steenzettingen over het algemeen iets toe. Bij de blokkensteenzetting neemt de stabiliteit veelal enigszins af. De invloed van de verlopende golfsteilheid is gering.

Aangezien golfhoogte en golfsteilheid in werkelijkheid met elkaar verbonden zijn, is het realistisch om behalve aanpassing d ook aanpassing e door te voeren. Het doorvoeren van aanpassing e in Steentoets is echter gecompliceerd. In combinatie met de geringe invloed wordt daarom aanbevolen om de golfsteilheid niet te laten verlopen in de tijd.

Als eenvoudiger, maar minder nauwkeurig, alternatief wordt aanbevolen in het hele rekenproces te rekenen met een iets ongunstigere golfperiode. Dit is eenvoudig in Steentoets op te nemen en de rekentijd zal niet significant toenemen.

#### **6.6 f: Hoek van golfaanval verloopt met de tijd**

Bij een verlopende hoek van golfinval van -40 tot 40 graden worden nauwelijks verschillen in de stabiliteit geconstateerd. Bij een verlopende hoek van golfinval van 0 tot 80 graden zijn de verschillen variabel. Afhankelijk van het type steenzetting, worden zowel toe- als afnamen van de stabiliteit geconstateerd.

Het doorvoeren van deze aanpassing is niet eenvoudig, doordat kennis over de relatie tussen windrotatie en diverse aspecten als de windsnelheid, windrichting, golfparameters, e.d. nog beperkt is. In combinatie met de geringe invloed, wordt daarom aanbevolen niet te rekenen met een in de tijd verlopende hoek van golfinval.

Als alternatieve oplossing wordt wel aanbevolen standaard te rekenen met een bepaalde golfinvalshoeksector van bijvoorbeeld 30 graden en daarvan altijd de meest ongunstige hoek te gebruiken. Dit alternatief is minder nauwkeurig, maar het geeft veilige resultaten. Het alternatief is eenvoudig in Steentoets door te voeren en de rekentijd neemt niet toe.

#### **6.7 g: Variërende stormduur**

In case g verandert de stabiliteit pas bij een stormduur van meer dan 85 uur. Een dergelijke stormduur is onrealistisch lang. Een eventuele doorvoering van deze aanpassing, met betrekking tot de toetsing van steenzettingen, betreft geen aanpassing in de programmering

van Steentoets, maar berust op het wijzigen van de toetsvoorschriften in de HR/VTV. Om deze redenen wordt aanbevolen deze aanpassing niet door te voeren.

## 6.8 h: Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken

In STEENTOETS2008 wordt gerekend met scherpe grenzen van de relevante waterstandrange. Daardoor kunnen geringe variaties in de steenzettinggeometrie of hydraulische parameters soms leiden tot grote resultaatverschillen. Door de grenzen meer diffuus te maken, zullen de resultaten meer continuïteit vertonen.

Het doorvoeren van deze aanpassing houdt in dat de rekenstructuur van STEENTOETS2008, voor het berekenen van de belastingduur, grotendeels wordt vervangen door een nieuwe rekenstructuur. De aanpassing is ingrijpend, maar is reeds vrijwel generiek toepasbaar uitgewerkt ten behoeve van dit onderzoek. De nieuwe rekenstructuur wordt beduidend korter en overzichtelijker. De rekentijd verandert naar verwachting niet veel. Doordat de continuïteit en de interpretatie van de resultaten wordt verbeterd, en de rekenstructuur wordt verhelderd, wordt deze aanpassing sterk aanbevolen.

Tevens wordt aanbevolen om in de gehele rekenprocedure te onderzoeken welke discontinuïteiten nog meer een diffuser verloop gegeven kan worden. Een meer continu verloop binnen de resultaten vergroot de betrouwbaarheid van Steentoets.

## 6.9 Overzicht aanbevelingen

Samengevat worden per aanpassing de volgende aanbevelingen gedaan om de schematisatie van de belastingduur in Steentoets te verbeteren:

- a. *Faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater.*  
Deze aanpassing wordt niet aanbevolen.
- b. *Lagere steenzettingen ook berekenen met lagere topwaterstanden.*  
Het wordt aanbevolen de stabiliteit te berekenen voor twee topwaterstanden. Eenmaal bij het toetspeil en eenmaal bij een lagere waterstand. Het wordt aanbevolen een formule te ontwikkelen die een benadering geeft van die lagere waterstand.
- c. *Alle 5 de locaties van het maximale stijghoogteverschil beschouwen.*  
Het wordt aanbevolen in Steentoets een statement te programmeren, die controleert of een golfklap op de te toetsen steenzetting valt. Als de golfklap niet op de te toetsen steenzetting valt, maar erboven, moet verder gerekend worden met het hoge stijghoogtefront.  
Tevens wordt aanbevolen te onderzoeken of het rekenproces van de belastingduur verder naar achteren verplaatst kan worden binnen het totale rekenproces van Steentoets.
- d. *Golfhoogte verloopt met waterstand en tijd.*  
Het wordt aanbevolen te rekenen met een verlopende golfhoogte.
- e. *Golfsteilheid verloopt met de tijd.*  
Het wordt niet aanbevolen te rekenen met een verlopende golfsteilheid. Wel wordt aanbevolen te rekenen met een constante, iets ongunstigere golfperiode.
- f. *Hoek van golfaanval verloopt met de tijd.*  
Het wordt niet aanbevolen te rekenen met een verlopende hoek van golfaanval. Wel wordt aanbevolen standaard te rekenen met een golfinvalshoeksector van bijvoorbeeld 30 graden en daarvan altijd de meest ongunstige hoek te gebruiken.
- g. *Variërende stormduur.*  
Deze aanpassing wordt niet aanbevolen.
- h. *Grenzen relevante waterstandrange diffuus maken.*

Het wordt aanbevolen te rekenen met diffuse grenzen van de relevante waterstandrange. Tevens wordt aanbevolen te onderzoeken welke discontinuïteiten van het rekenproces nog meer een diffuser verloop gegeven kan worden.

Doordat de meeste van deze wijzigingen slechts doorgevoerd kunnen worden als het wettelijk toetsinstrumentarium ( $WTI = VTV + HR$ ) op het betreffende punt wordt gewijzigd, en dit een langdurig proces is, wordt voorlopig alleen aanbevolen om de wijzigingen van c en h te implementeren in Steentoets.



## 7 Referenties

Blom, J.A.H. (2007)

Implementatie effectieve belastingduur steenzettingen

Fase 1: tijdelijke waarden langeduursterkte

Haskoning, concept verslag 9S2392.B0, 22 juni 2007

Klein Breteler, M., en W.D. Eysink (2005)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Langeduursterkte van steenzettingen

WL | Delft Hydraulics, rapport H4475, november 2005

Klein Breteler, M. (2009)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Documentatie STEENTOETS2008

Deltares, rapport H4846, februari 2009

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, (VTV2006)

Den Haag, (ISBN 978-90-396-5762-5), september 2007

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen, (HR2006)

Den Haag, (ISBN 978-90-396-5761-8), september 2007

Van der Sande (2010)

Verloop van de belastingduur bekleding over het talud

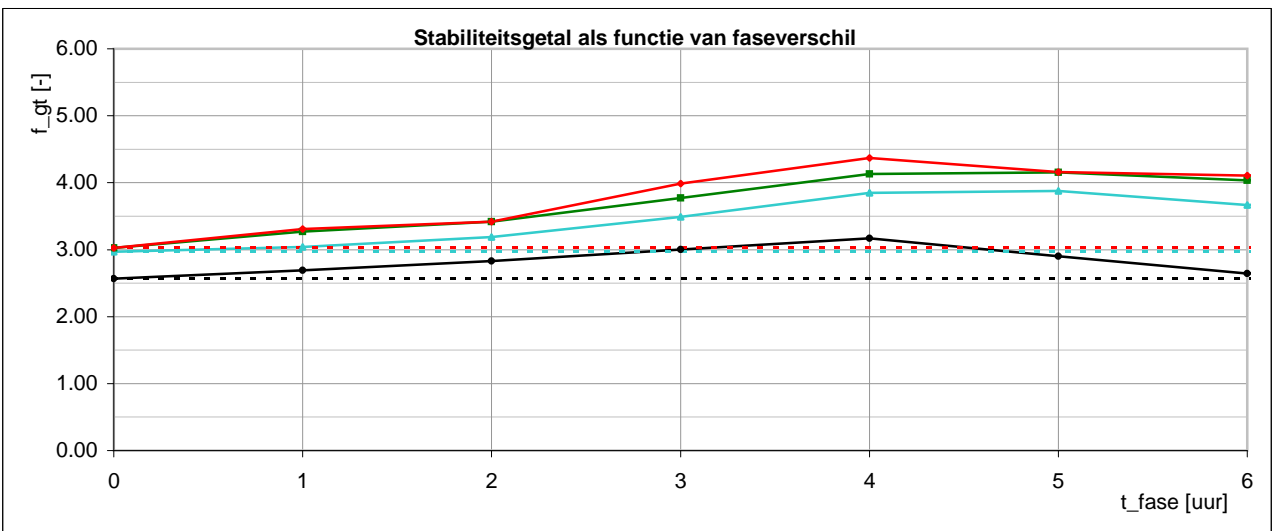
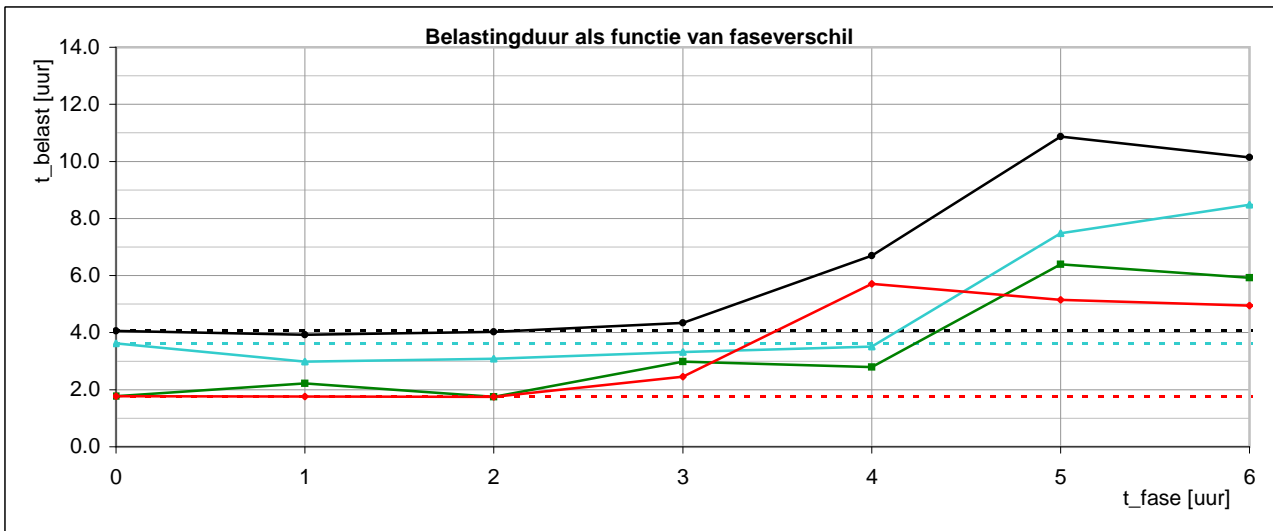
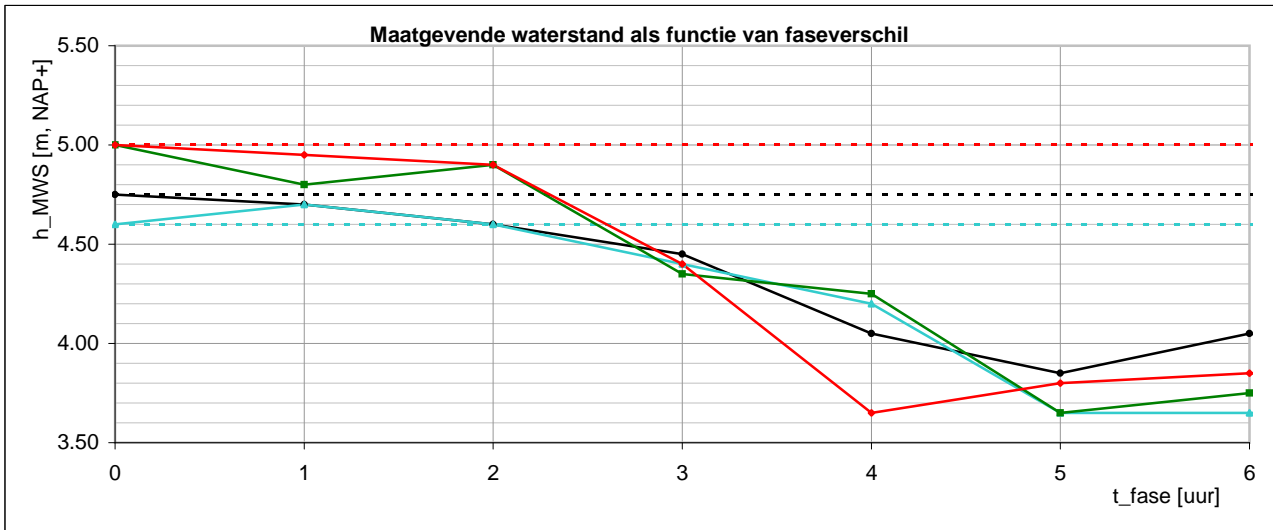
Waterschap Zeeuwse Eilanden, memo, 25 januari 2010





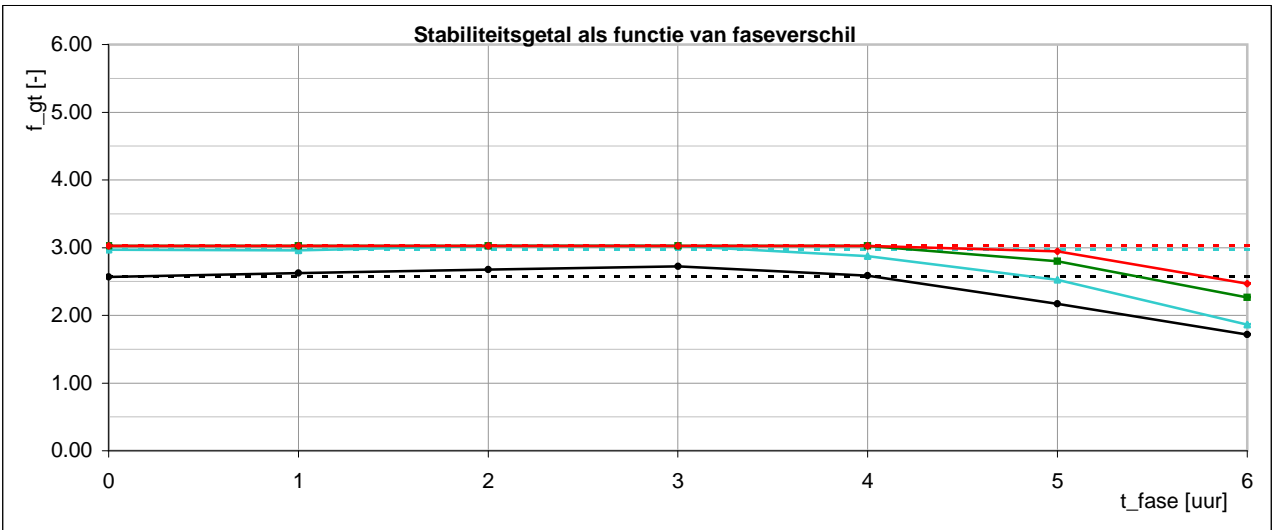
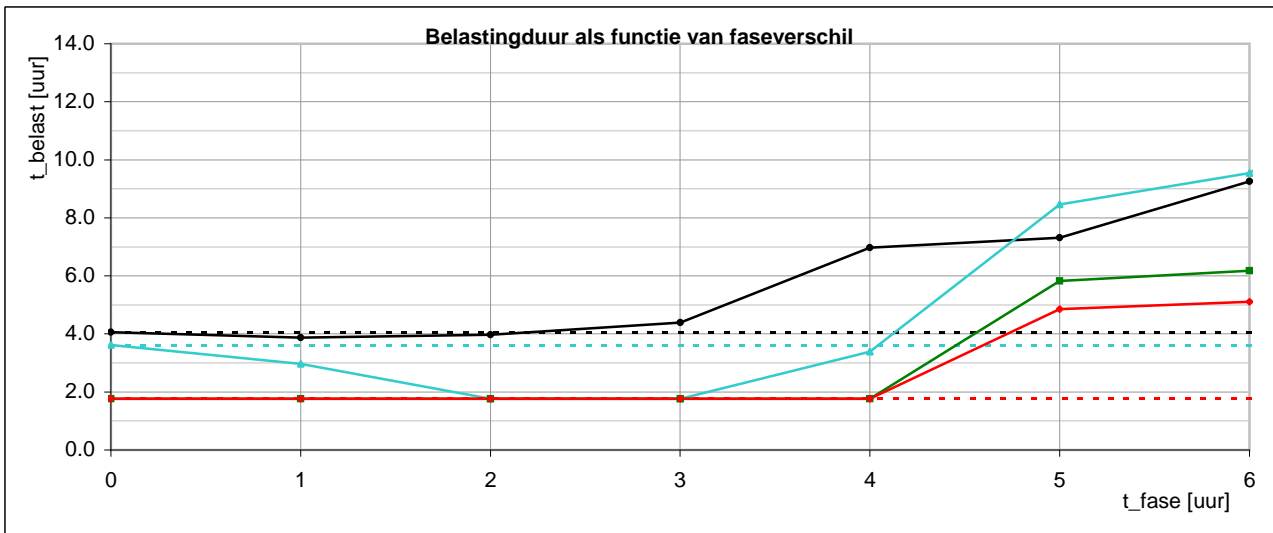
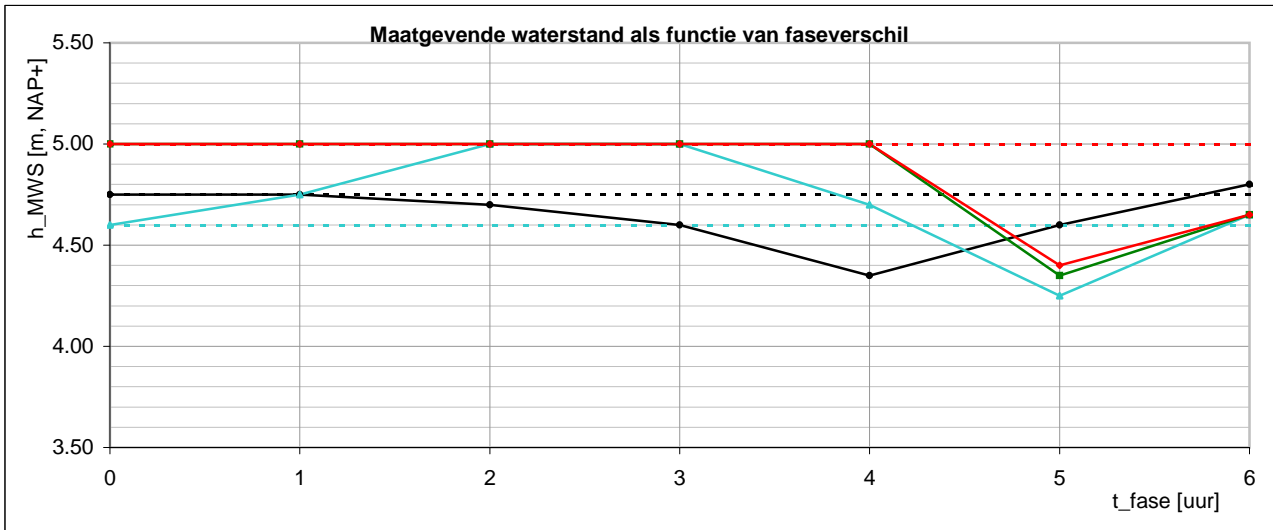
## A Bijlagen





- St.2008.a.1 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.a.1 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.a.1 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ◆— St.2008.a.1 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Invloed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	H <sub>s</sub> *ksi = ca. 3.8	Betonzuilen
	Resultaten Case a.1	
<b>DELTAIRES</b>	1202551.007	FIG. A.1



- |                                                    |                                                    |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| —●— St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —●— St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Involed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$H_s * ksi = \text{ca. } 3.8$

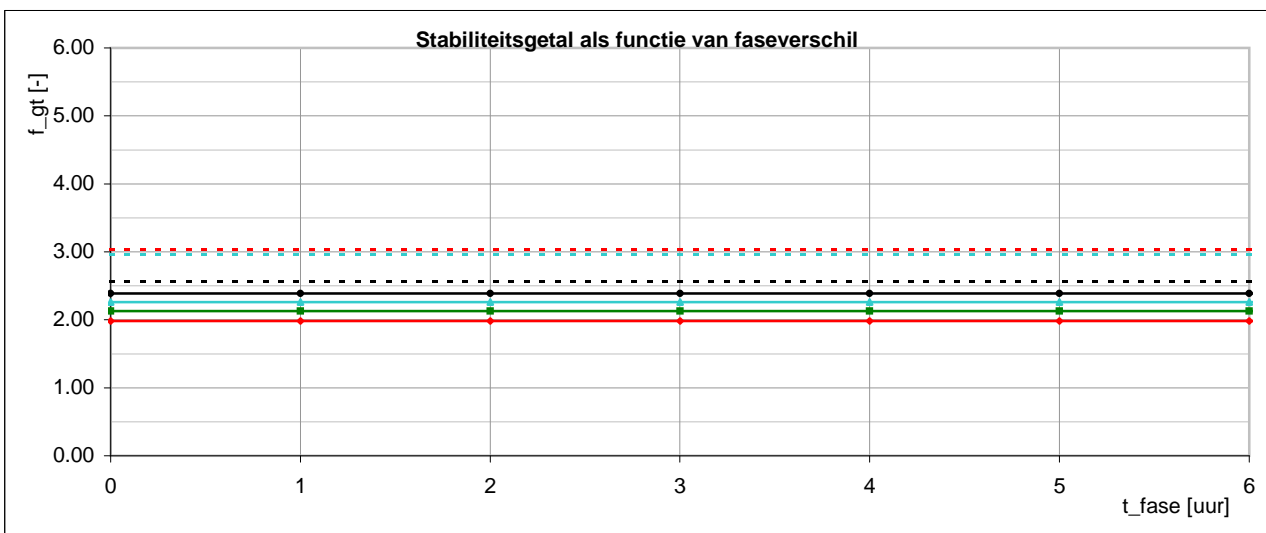
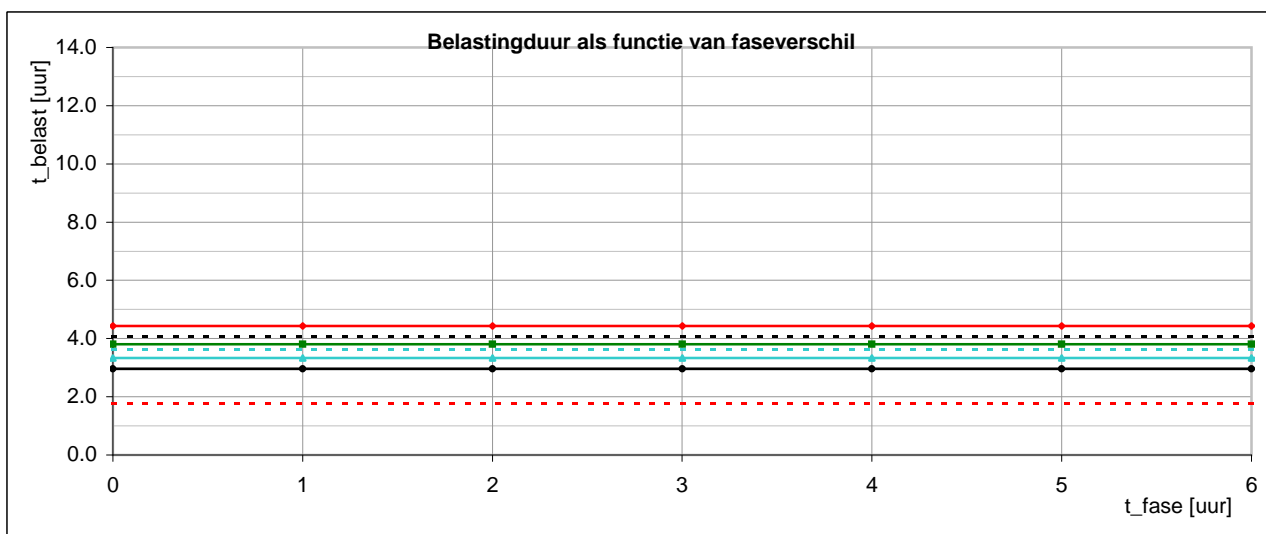
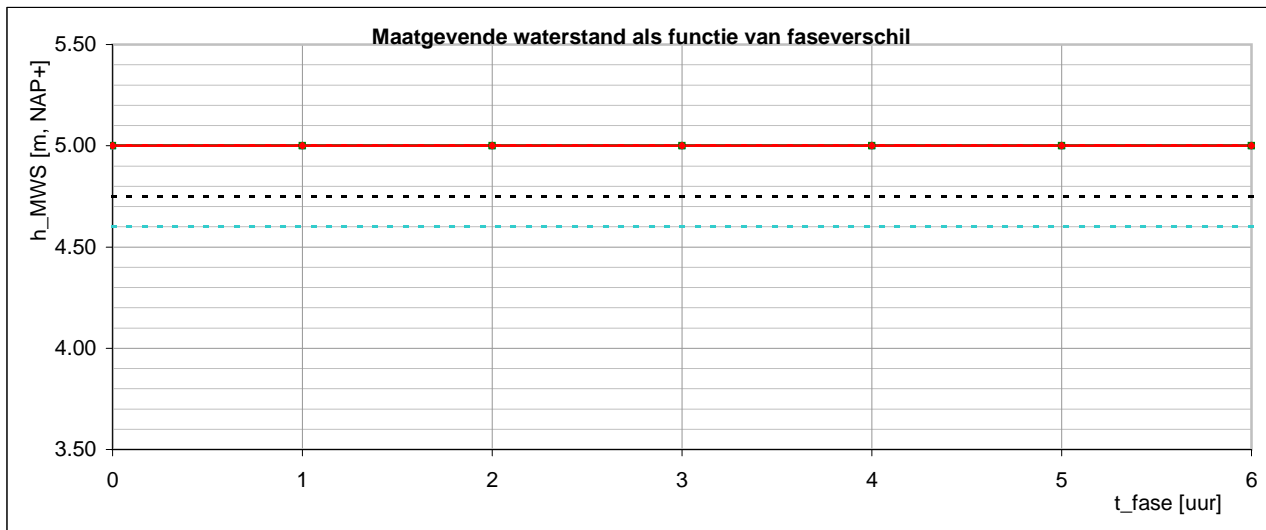
Betonzuilen

Resultaten Case a.2

**DELTA**RES

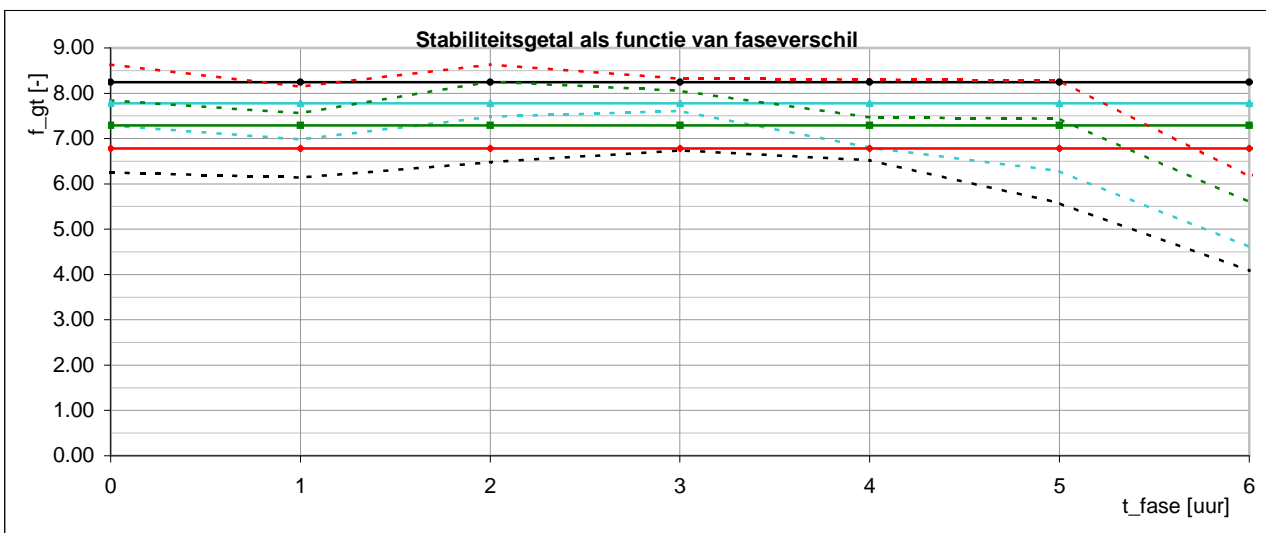
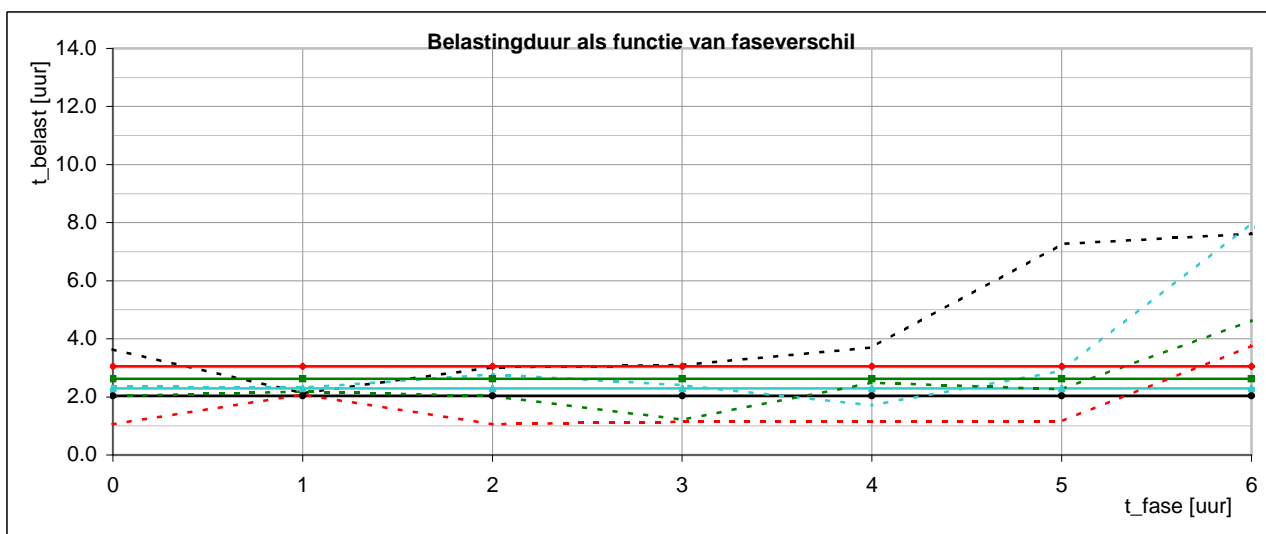
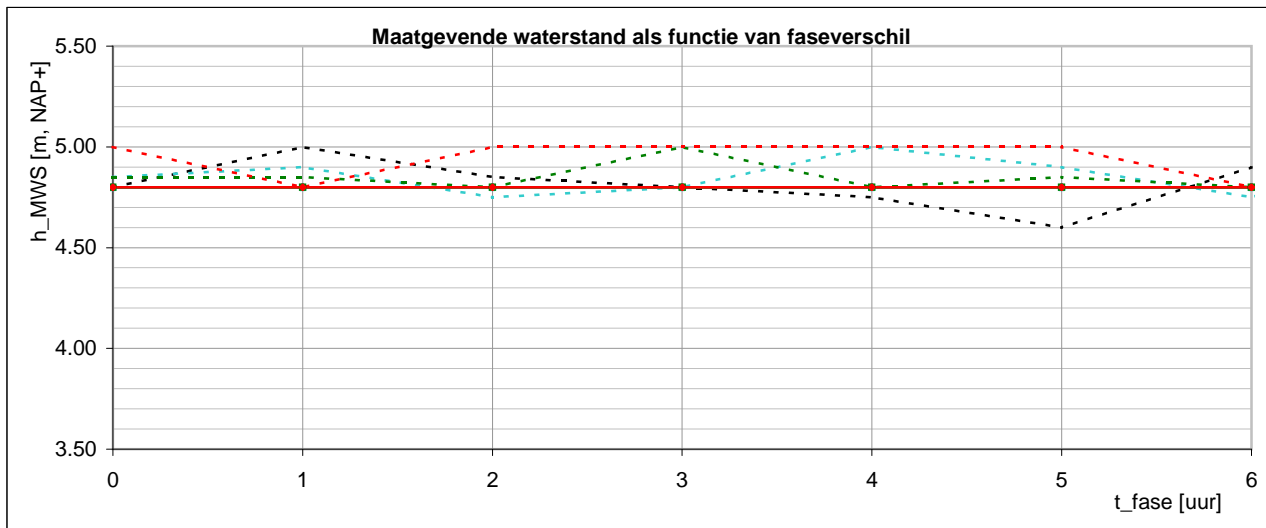
1202551.007

FIG. A.2



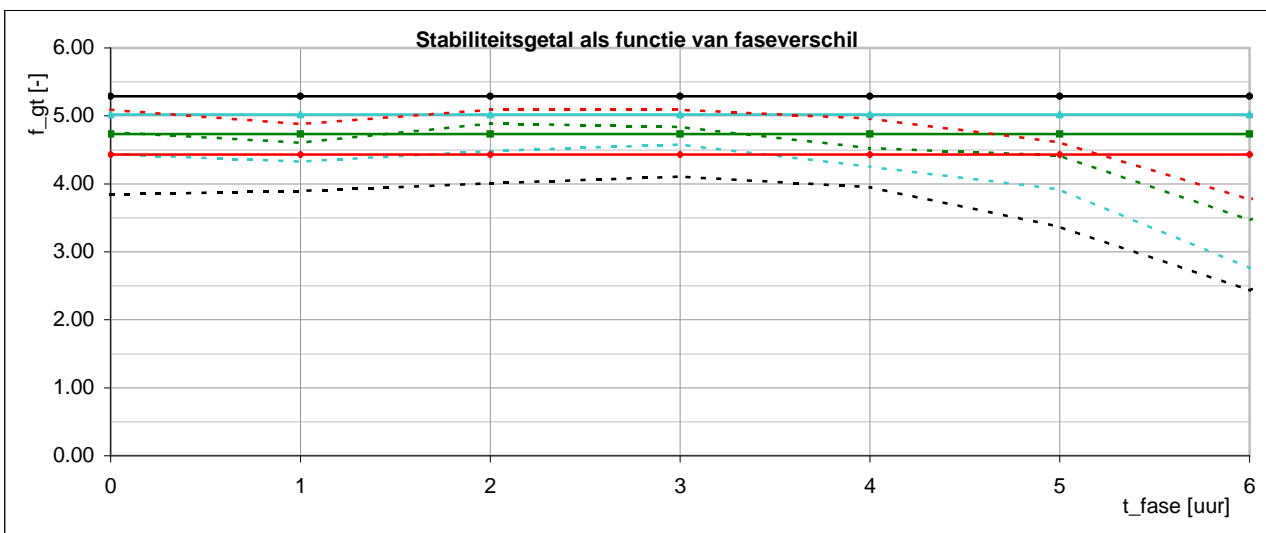
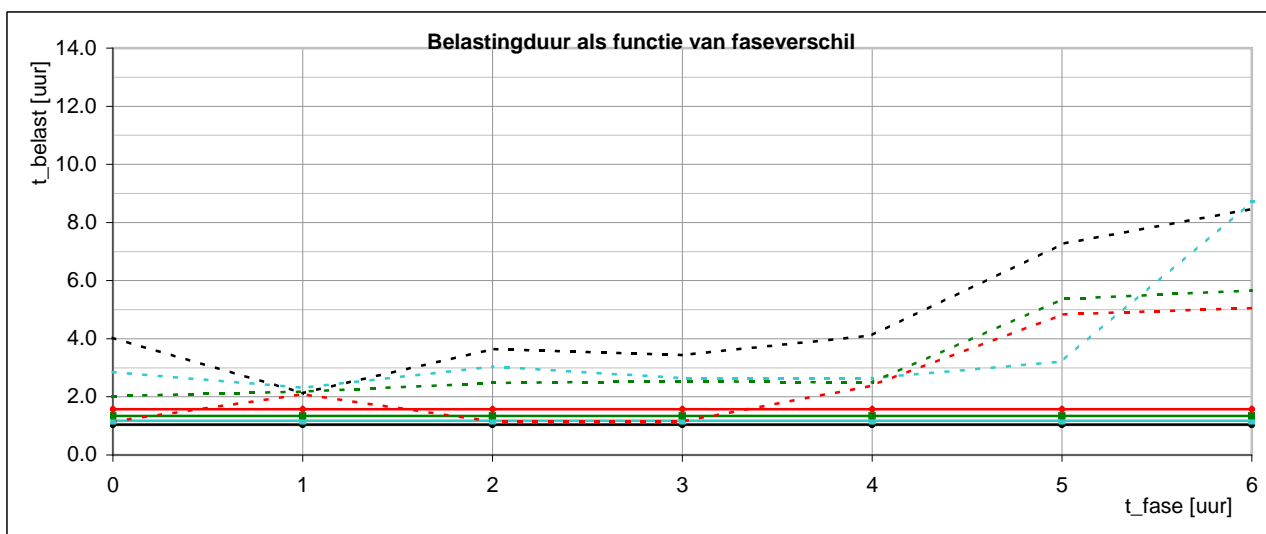
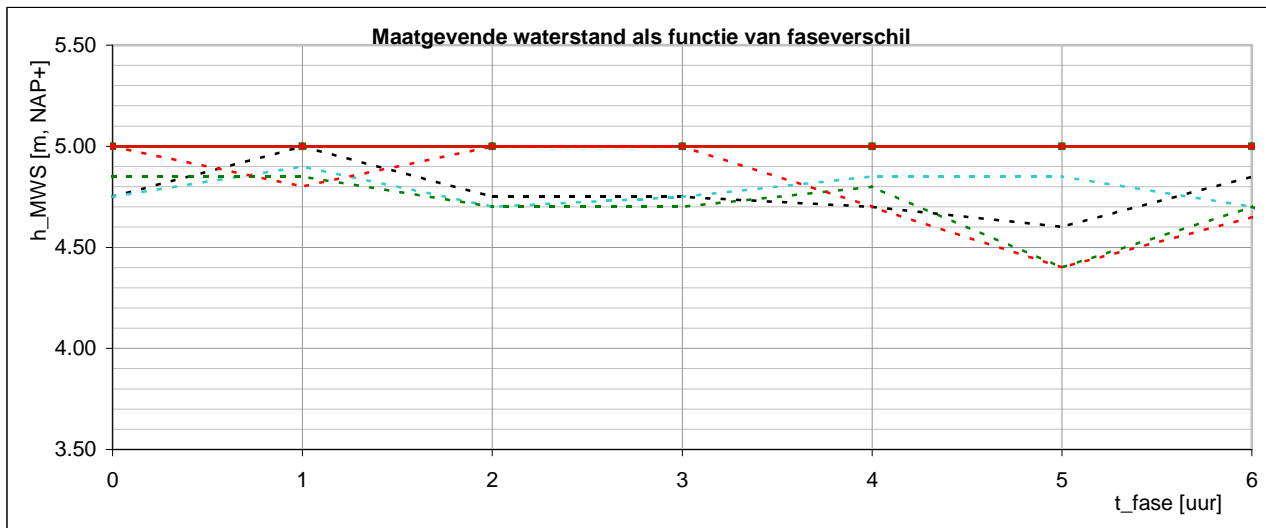
- |                                                                                       |                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: black;">—●—</span> St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | <span style="color: black;">- - - -</span> ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| <span style="color: cyan;">—●—</span> St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m  | <span style="color: cyan;">- - - -</span> ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m  |
| <span style="color: green;">—■—</span> St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | <span style="color: green;">- - - -</span> ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| <span style="color: red;">—●—</span> St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m   | <span style="color: red;">- - - -</span> ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m   |

Invloed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	$H_s * ksi = \text{ca. } 3.8$	Betonzuilen
	Resultaten Case a.3	
<b>DELTA RES</b>	1202551.007	FIG. A.3.1



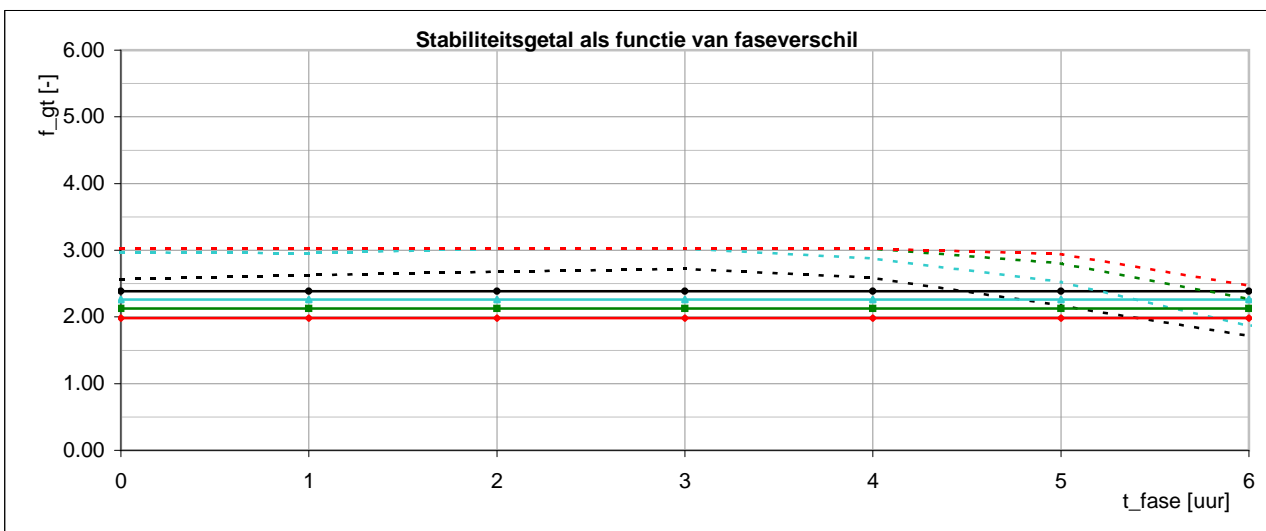
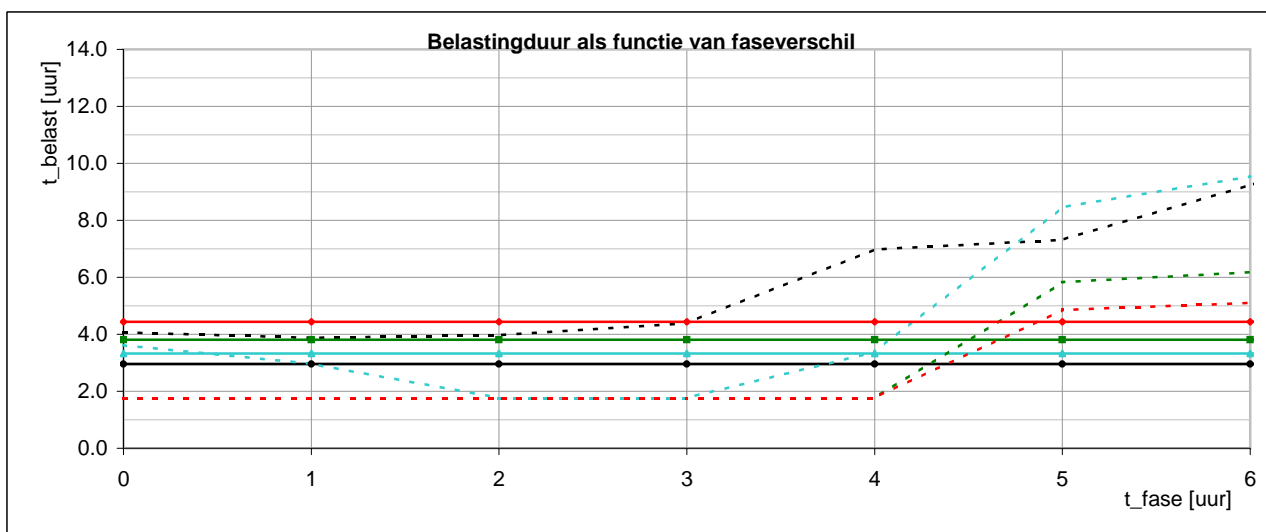
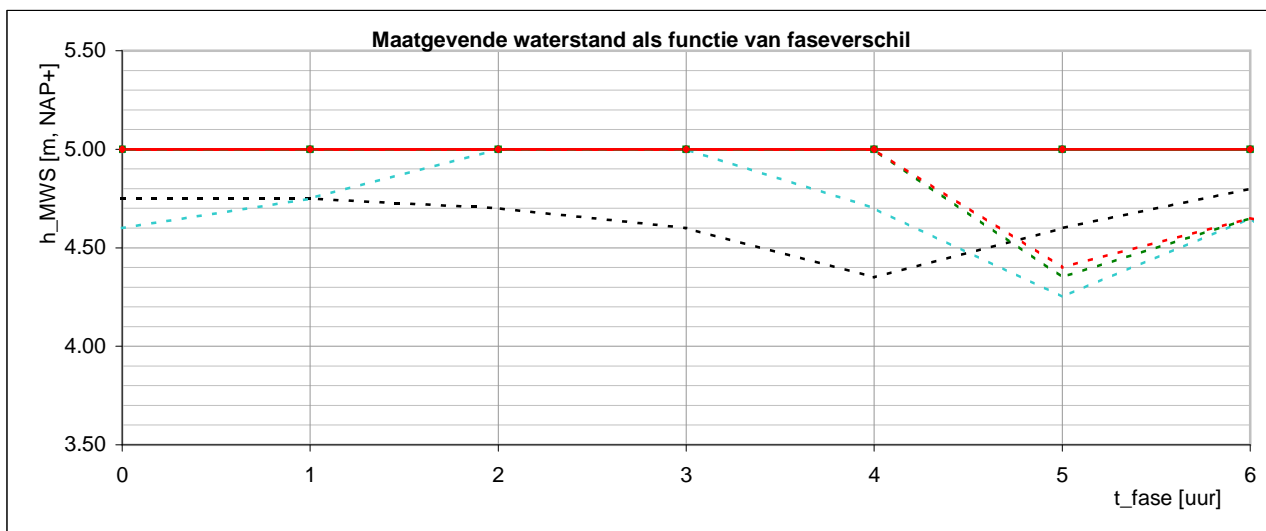
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Invloed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	H <sub>s</sub> *ksi = ca. 1.9	Betonzuilen
	Resultaten Case a.3	
<b>DELTA RES</b>	1202551.007	FIG. A.3.2



- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Invloed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	H <sub>s</sub> *ksi = ca. 2.3	Betonzuilen
	Resultaten Case a.3	
<b>DELTA</b>	1202551.007	FIG. A.3.3



- |                                                    |                                                        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —●— St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Involed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$H_s * ksi = ca. 3.8$

Betonzuilen

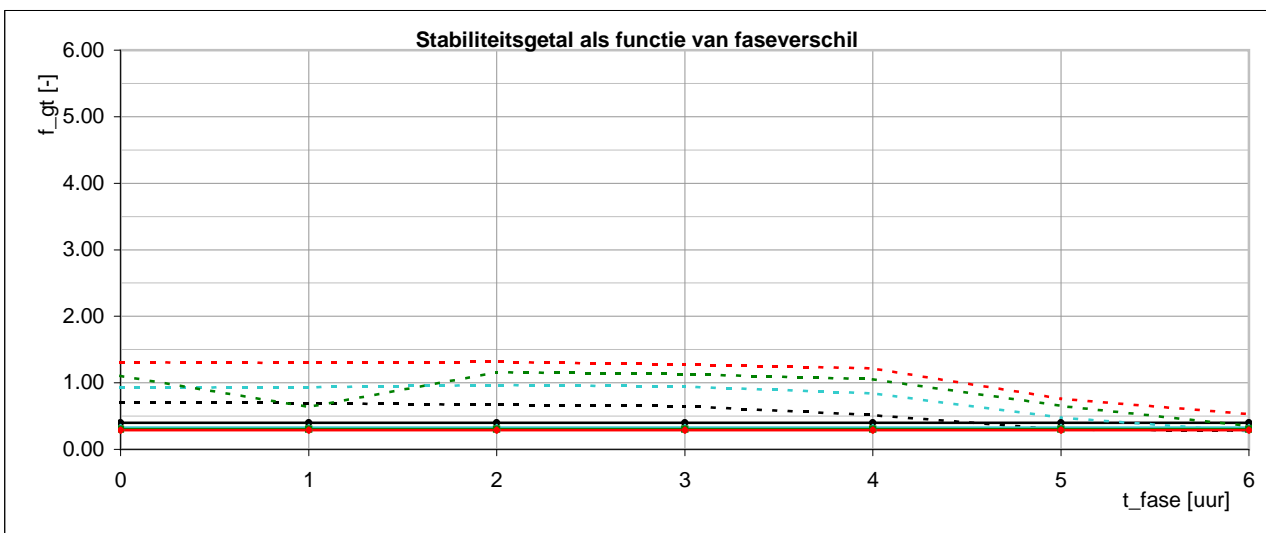
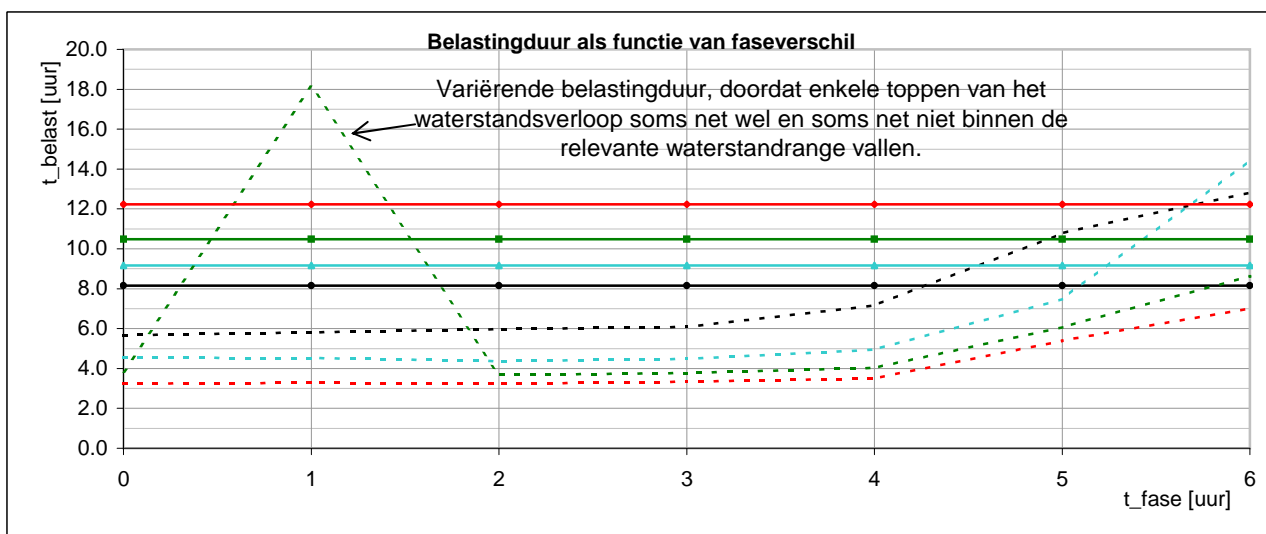
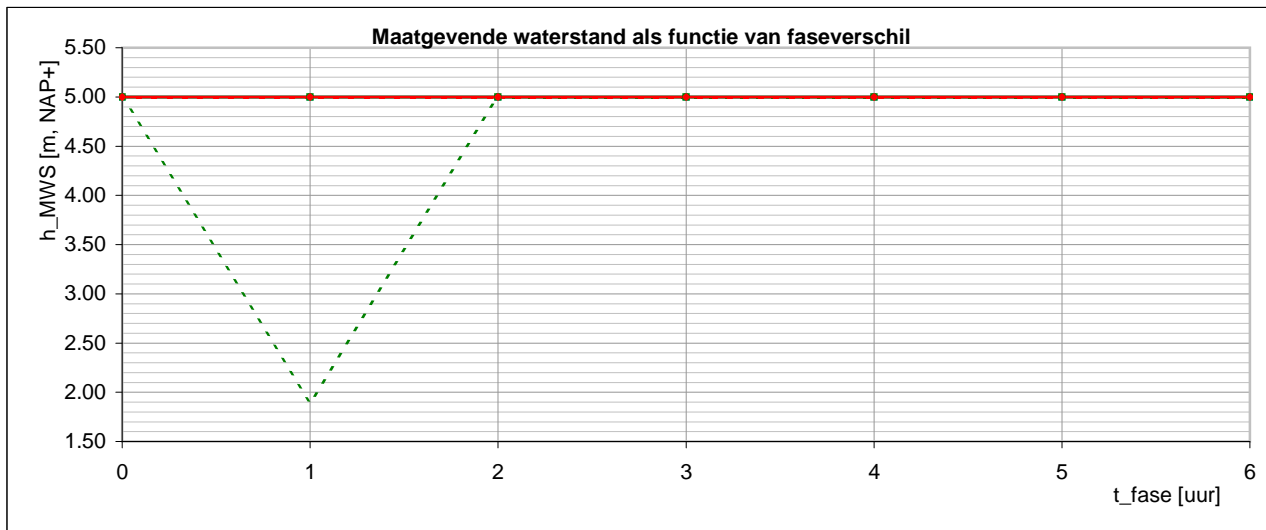
Resultaten Case a.3

**DELTA**RES

1202551.007

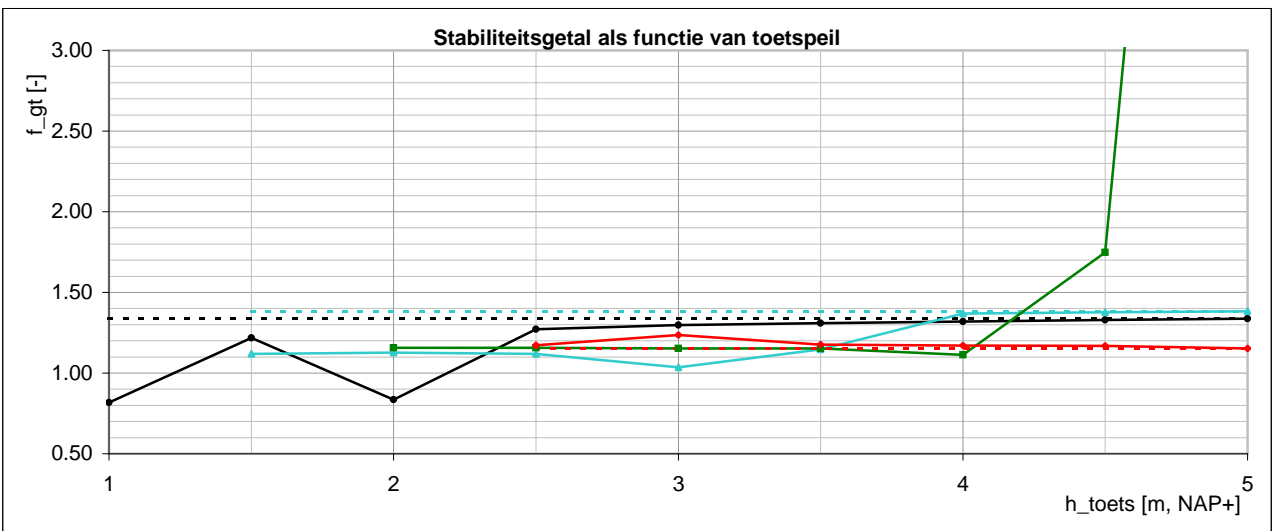
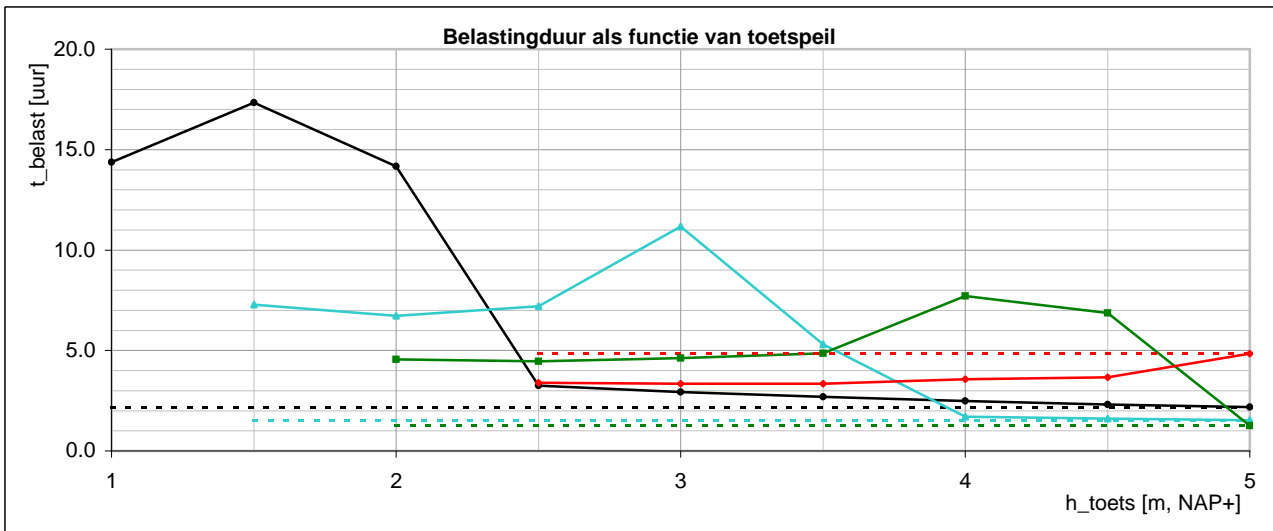
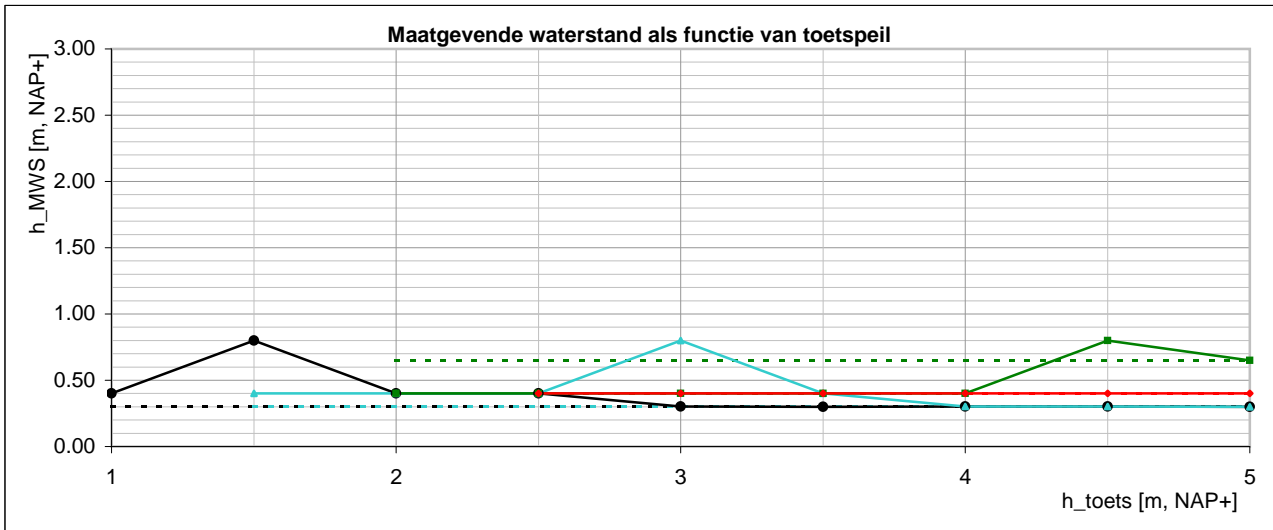
FIG. A.3.4





- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.a.3 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- - - St.2008.a.2 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

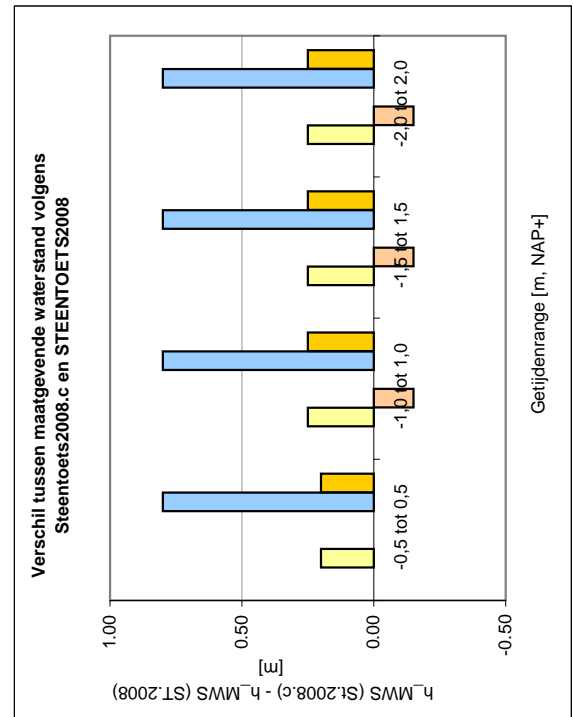
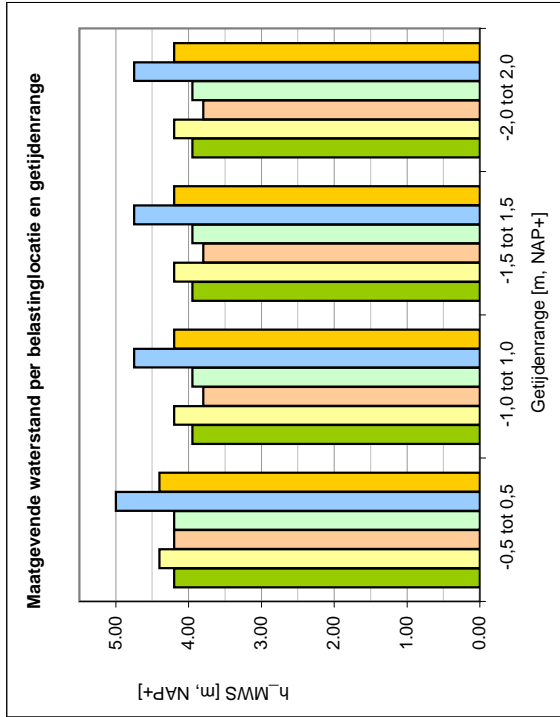
Invloed faseverschil tussen top stormopzet en hoogwater Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	H <sub>s</sub> *ksi = ca. 8,2	Betonzuilen
	Resultaten Case a.3	
<b>DELTA RES</b>	1202551.007	FIG. A.3.5



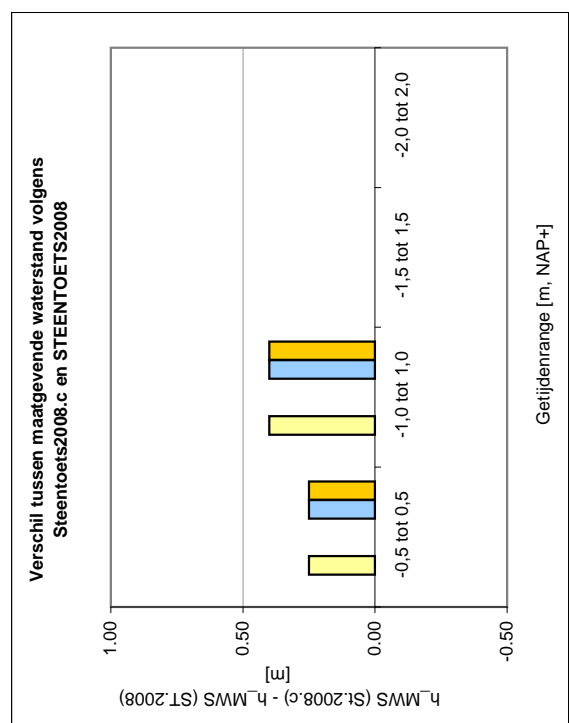
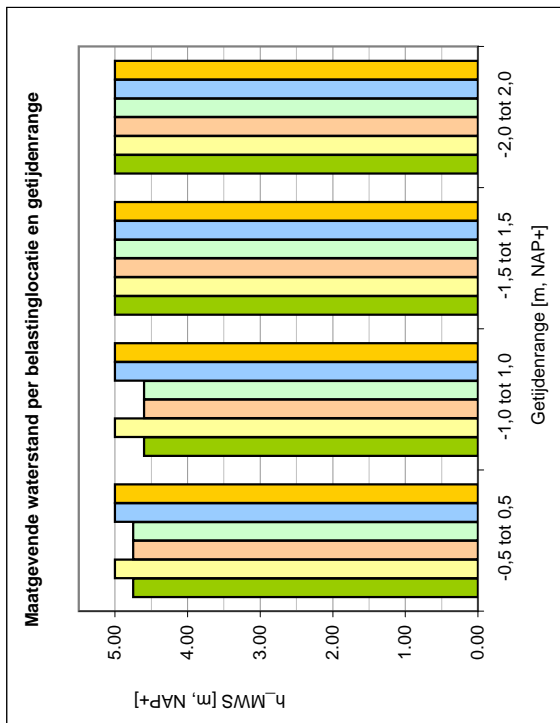
- |                                                  |                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.b - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —▲— St.2008.b - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.b - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —◆— St.2008.b - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed lager toetspeil bij lager gelegen steenzetting Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	Betonzuilen
	Resultaten Case b
<b>DELTARES</b>	1202551.007 <span style="float: right;">FIG. B.1</span>

Type steenzetting: **Blokken**



Type steenzetting: **Betonzuilen**



Invloed berekenen alle 5 de belastinglocaties  
Schematisatie van de belastingduur n Steentoets

Maatgevende waterst.

Betonzuilen / Blokken

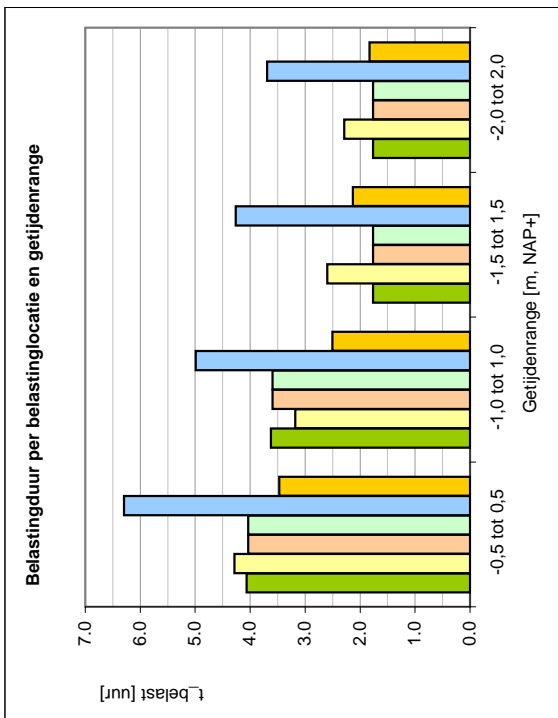
Resultaten Case c

DELTAIRES

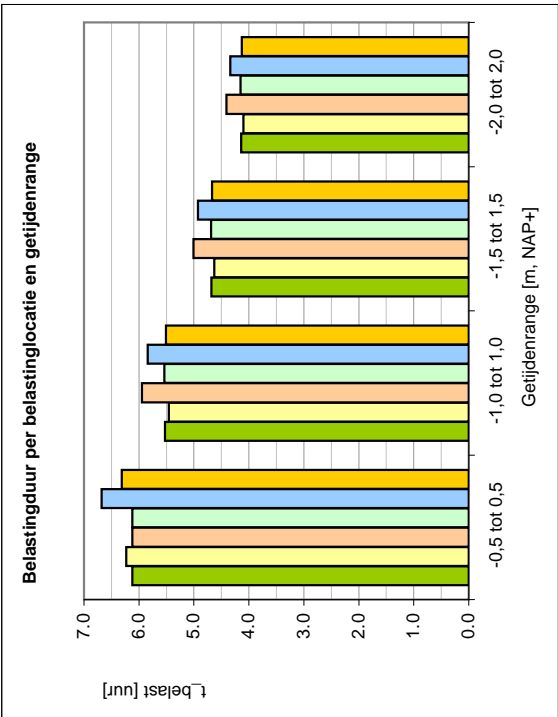
1202551.007

FIG. C.1

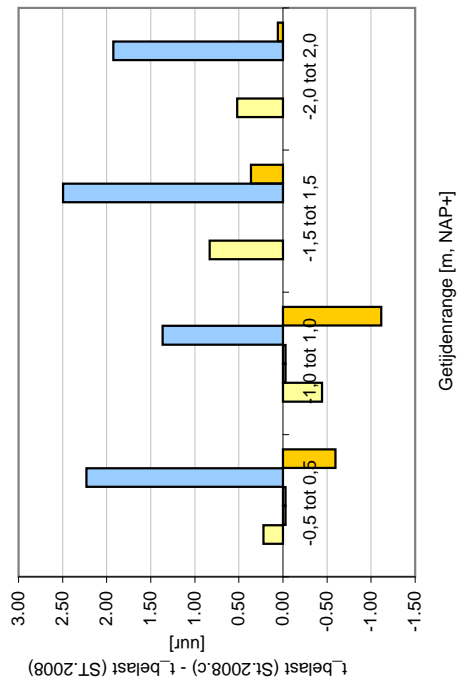
**Type steenzetting: Betonzuilen**



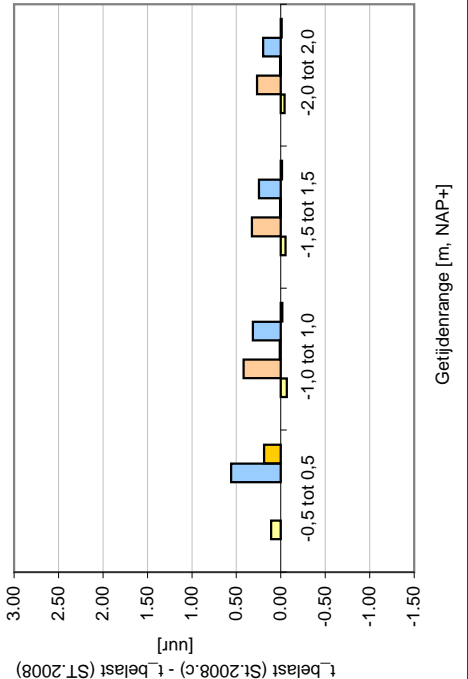
**Type steenzetting: Blokken**



**Verskil tussen belastingduur volgens Steentoets2008.c en STEENTOETS2008**



**Verskil tussen belastingduur volgens Steentoets2008.c en STEENTOETS2008**



Invloed berekenen alle 5 de belastinglocaties  
Schematisatie van de belastingduur n Steentoets

Belastingduur

Betonzuilen / Blokken

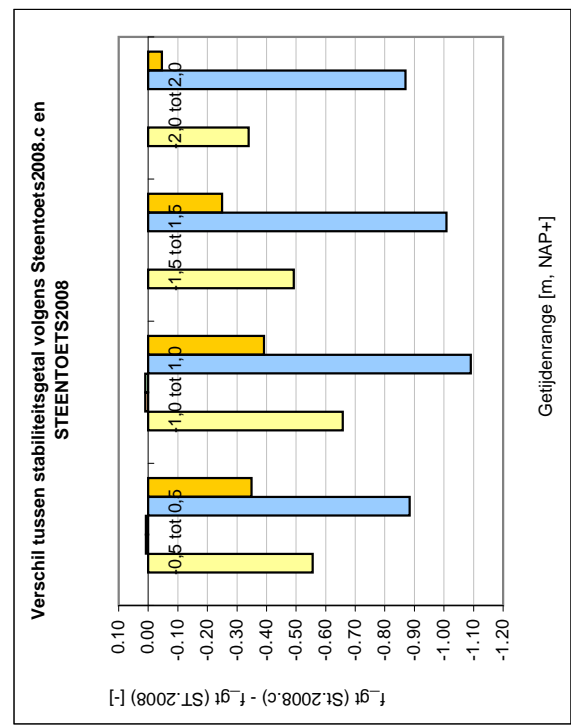
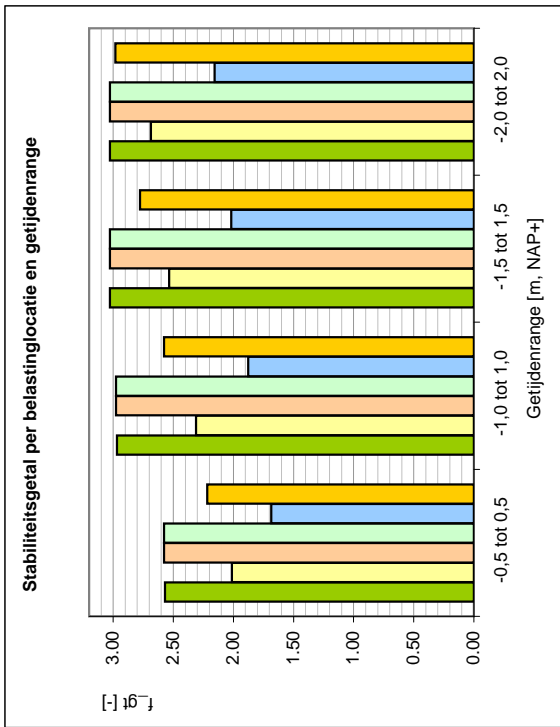
Resultaten Case c

DELTAIRES

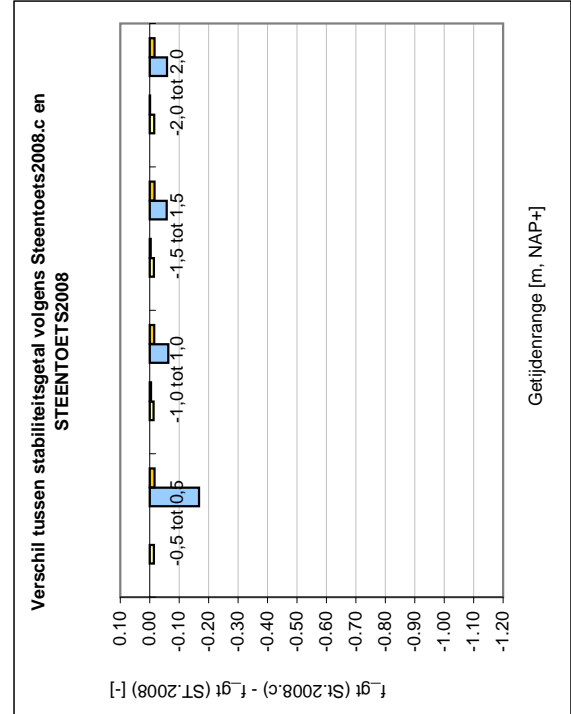
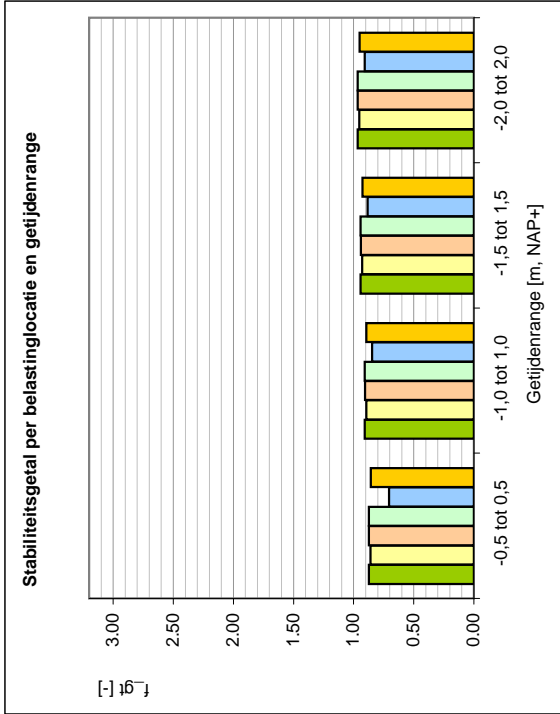
1202551.007

FIG. C.2

### Type steenzetting: Betonzuilen



### Type steenzetting: Blokken



Invloed berekenen alle 5 de belastinglocaties  
Schematisatie van de belastingduur n Steentoets

Stabiliteitsgetal

Betonzuilen / Blokken

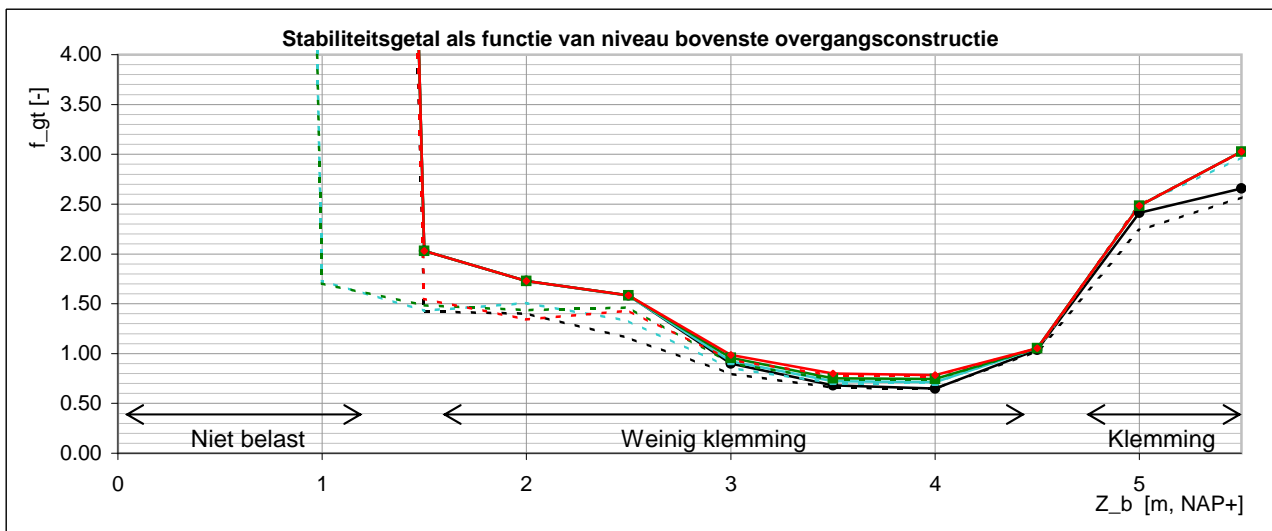
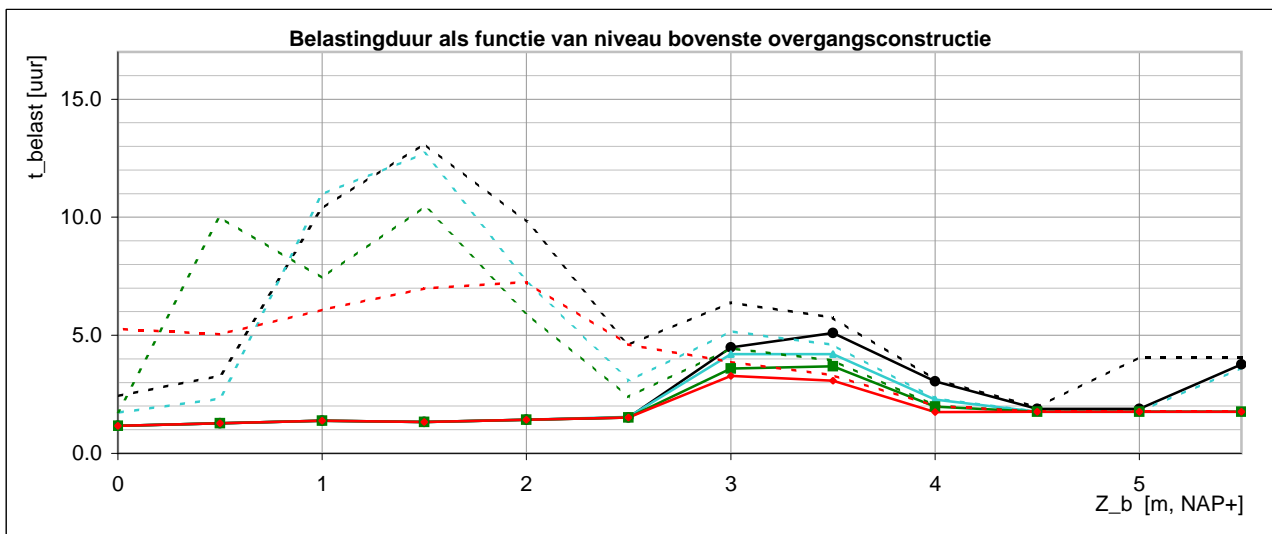
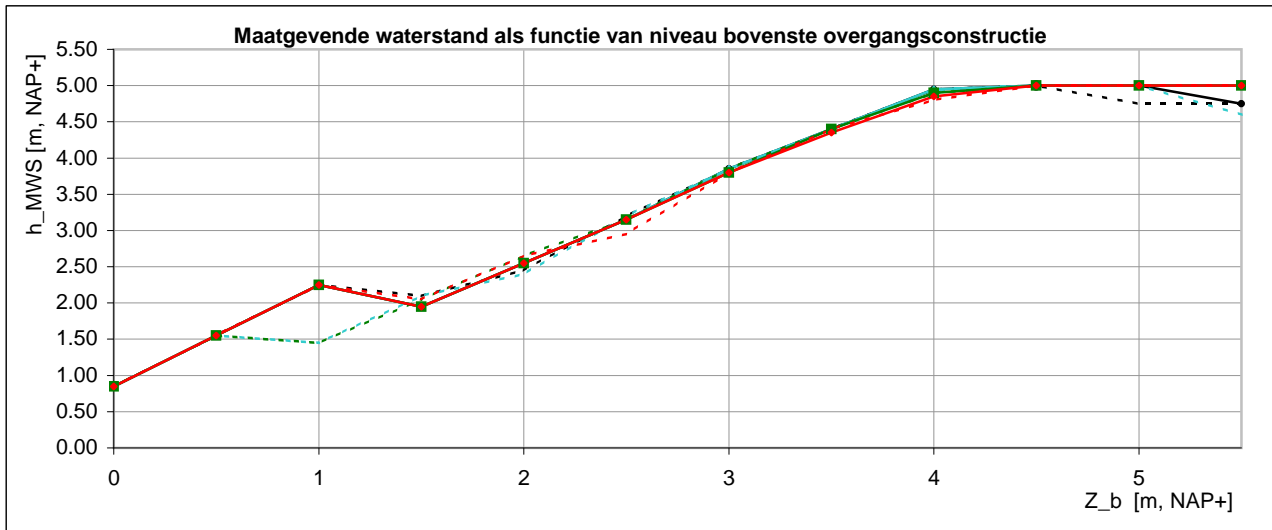
Resultaten Case c

DELTA RES

1202551.007

FIG. C.3

## Steenzetting: Betonzuilen



- |                                                  |                                                  |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.d - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —◆— St.2008.d - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed verlopende golfhogte met waterstand en tijd  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

Betonzuilen

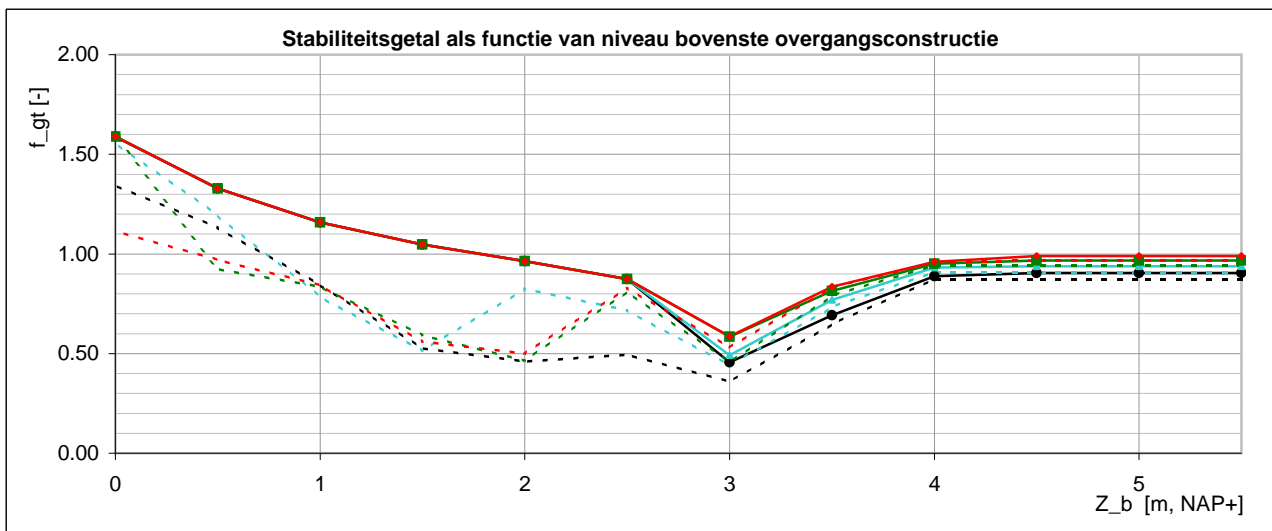
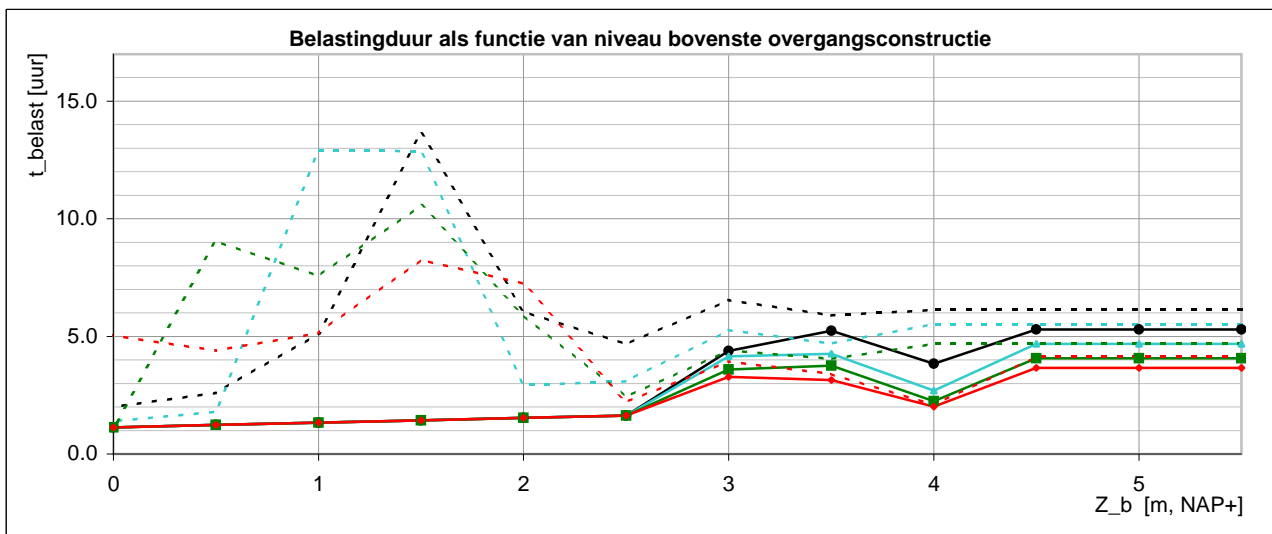
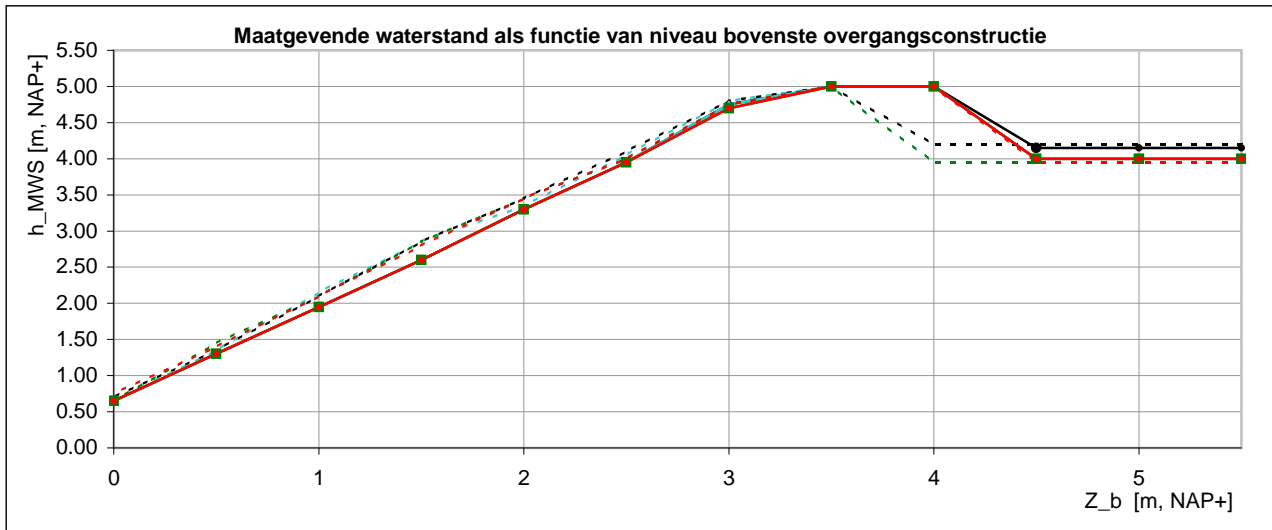
Resultaten Case d

DELTAIRES

1202551.007

FIG. D.1

## Steenzetting: Blokken



- |                                                  |                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.d - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed verlopende golfhoogte met waterstand en tijd  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

Blokken

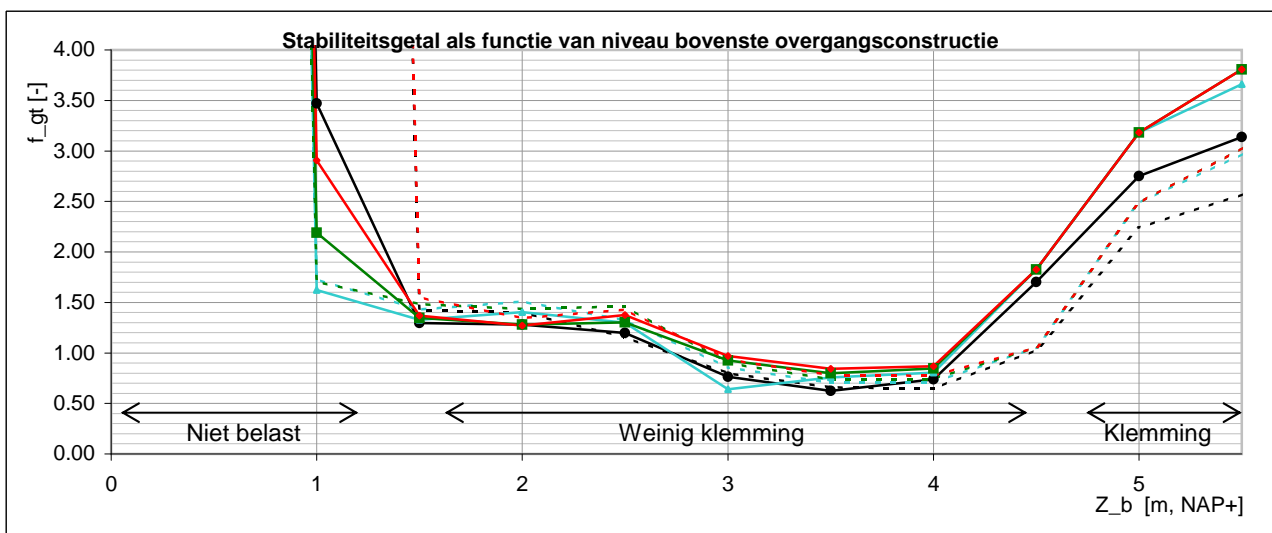
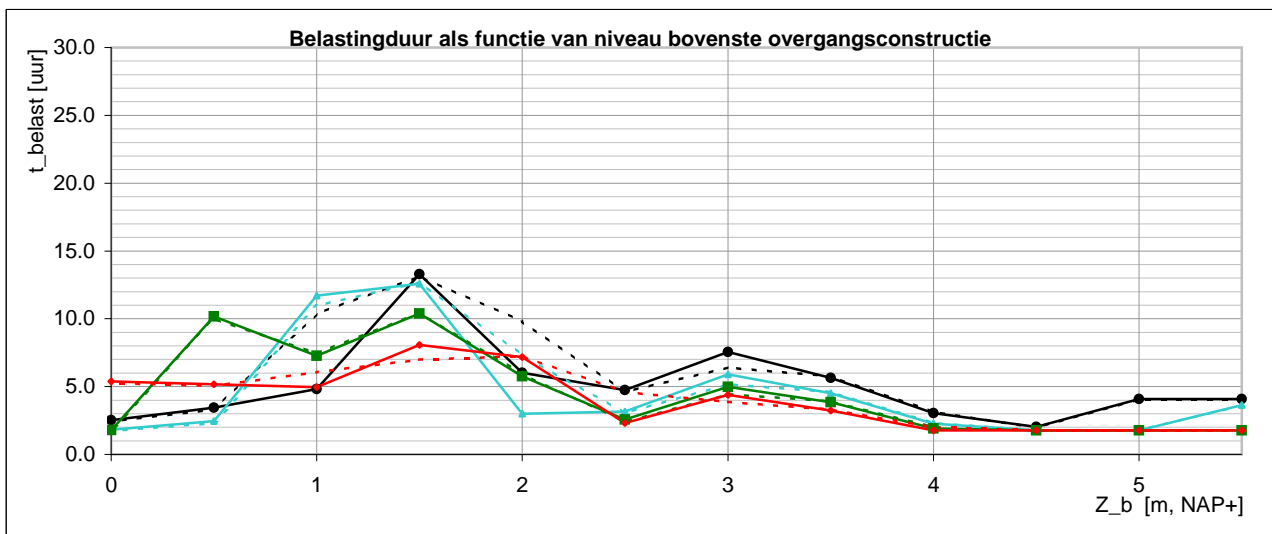
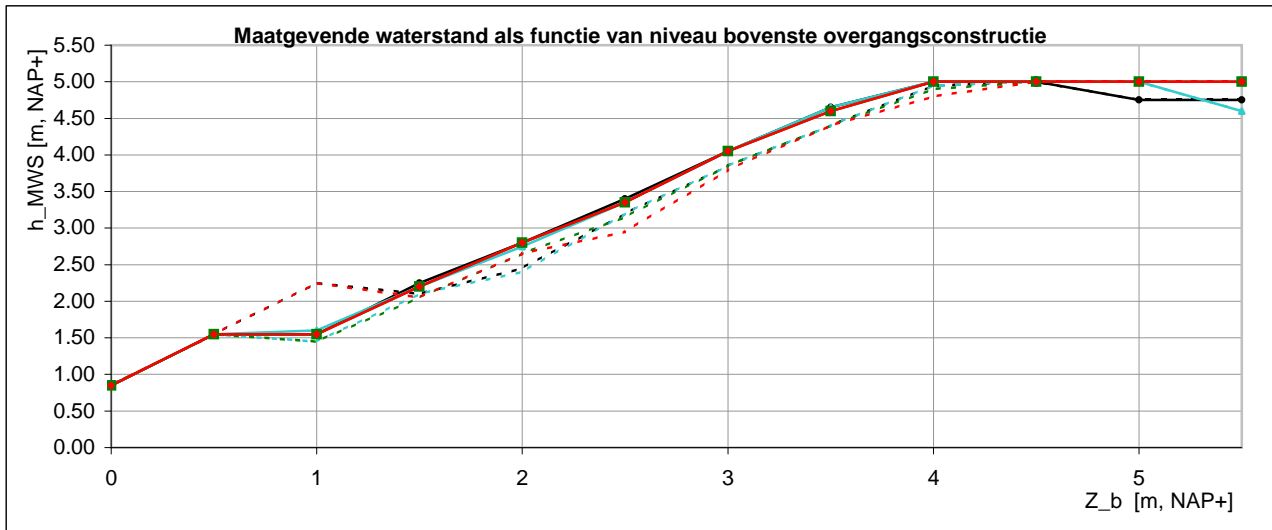
Resultaten Case d

DELTAIRES

1202551.007

FIG. D.2

## Steenzetting: Betonzuilen



- |                                                  |                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.e - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.e - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed verlopende golfsteilheid met waterstand en tijd  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

Betonzuilen

Resultaten Case e

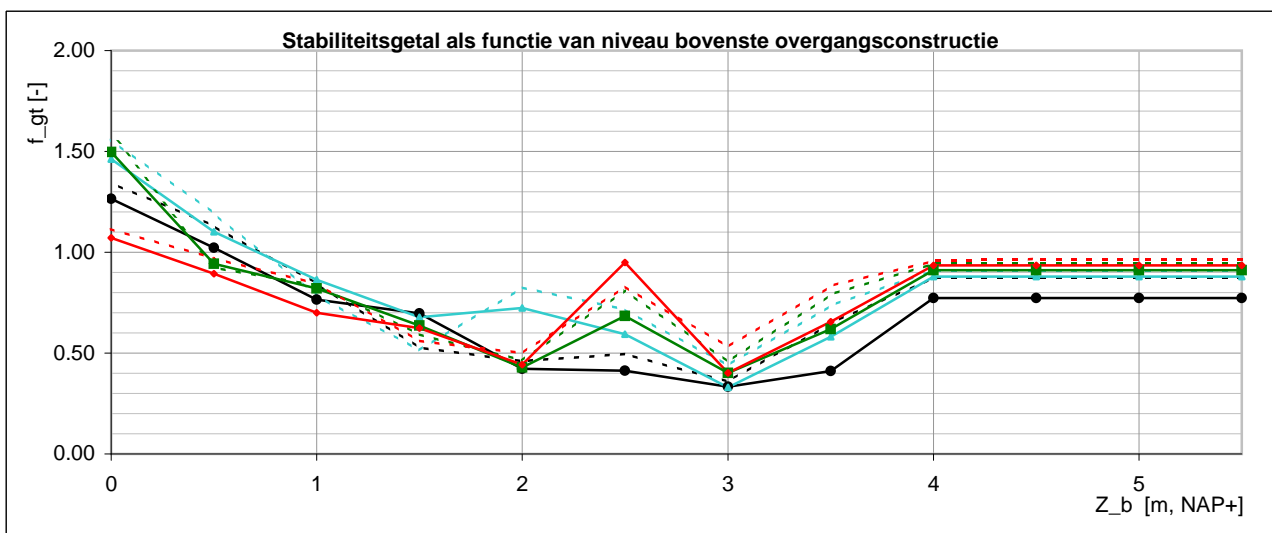
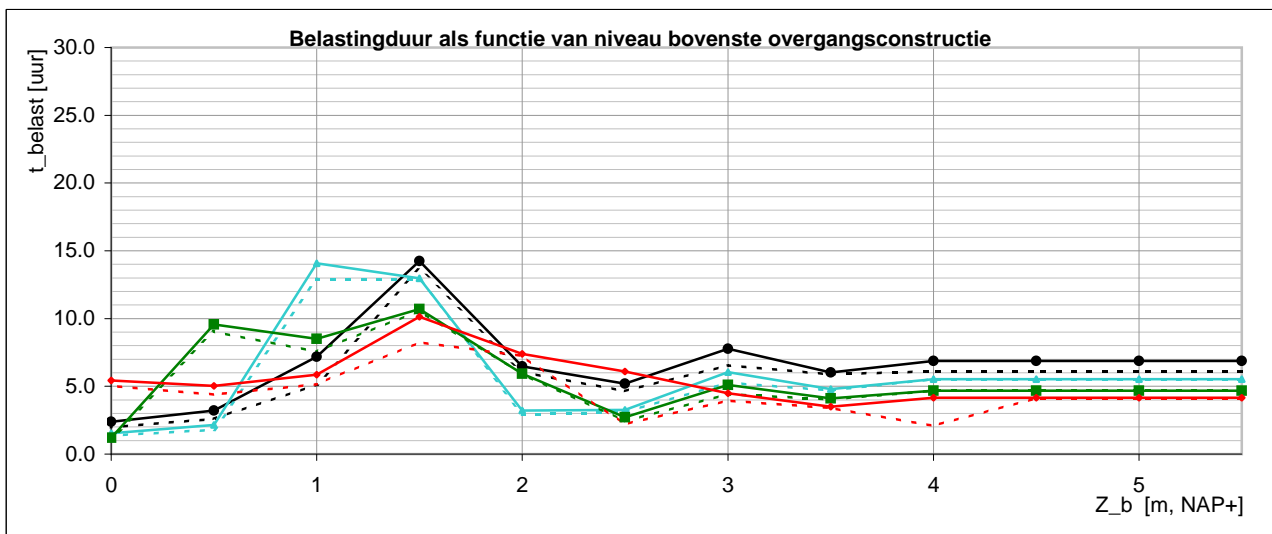
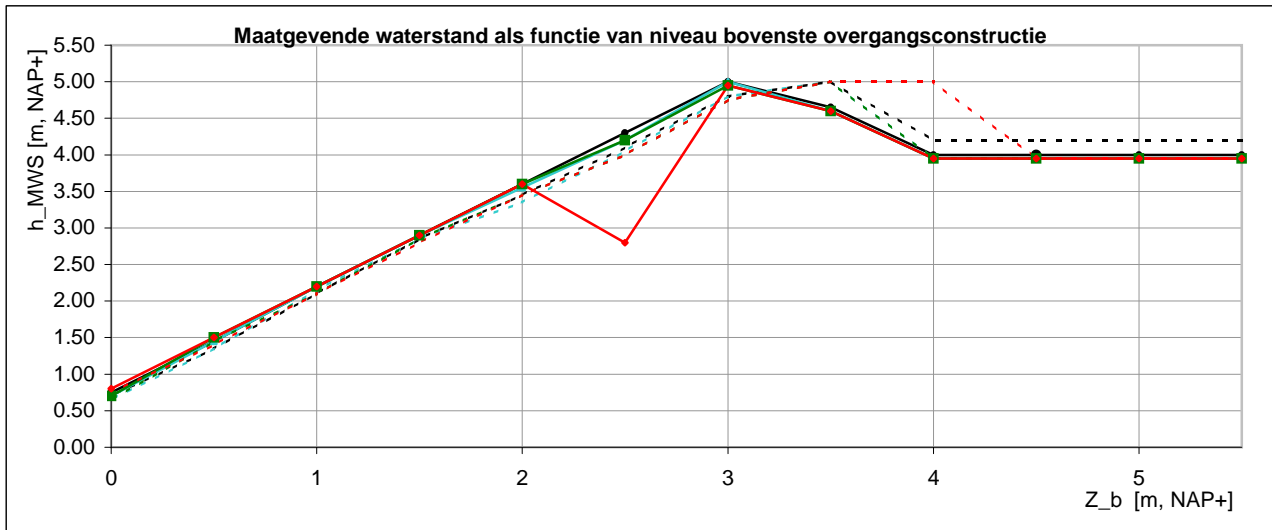
DELTAIRES

1202551.007

FIG. E.1



## Steenzetting: Blokken



- |                                                  |                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.e - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —◆— St.2008.e - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed verlopende golfsteilheid met waterstand en tijd  
Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

Blokken

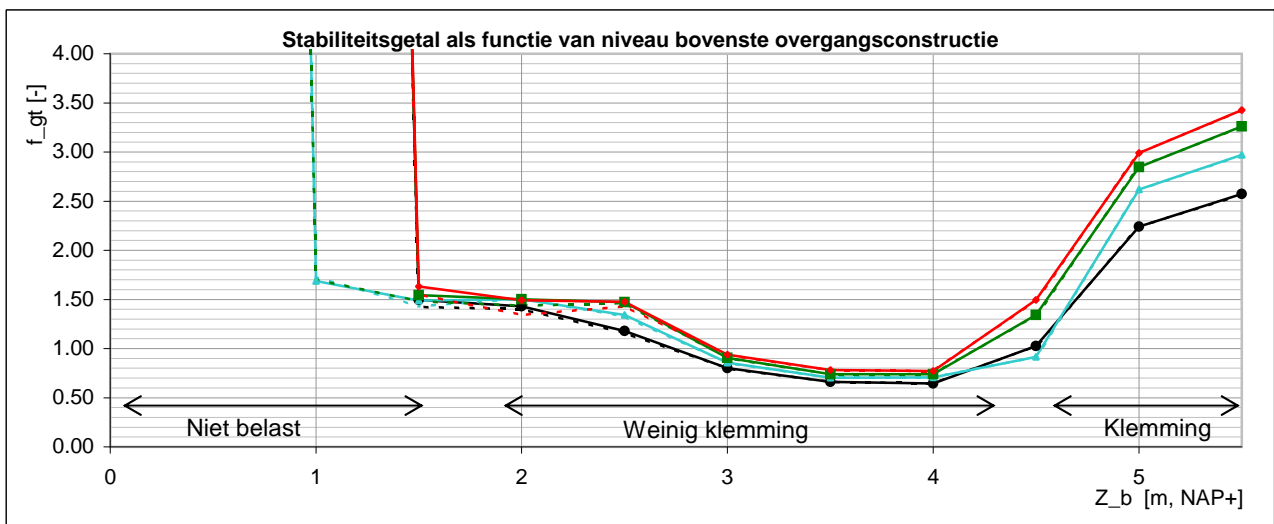
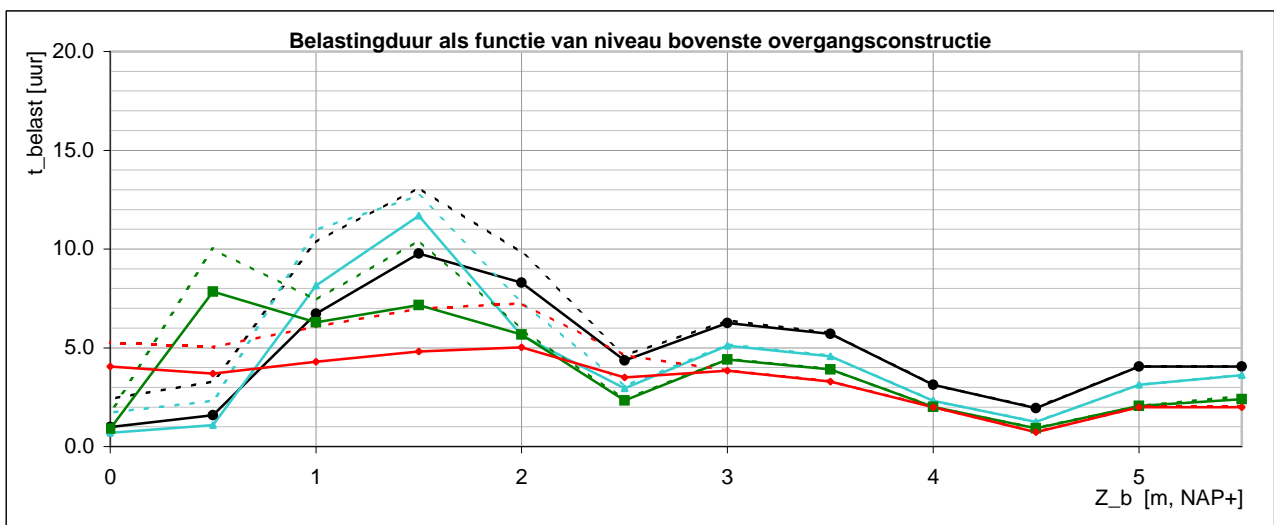
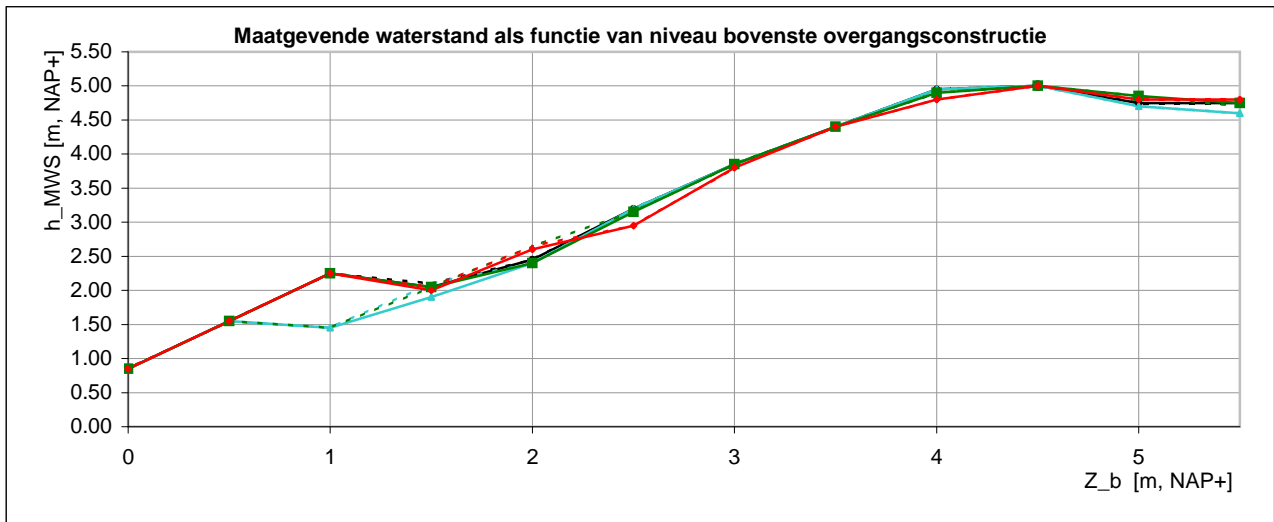
Resultaten Case e

DELTAIRES

1202551.007

FIG. E.2

**Steenzetting: Betonzuilen**  
 ( $\beta$  verloopt van -40 tot 40 graden)



- St.2008.f - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Involed verlopene golfrichting met de tijd  
 Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$\beta$  van -40° tot 40°

Betonzuilen

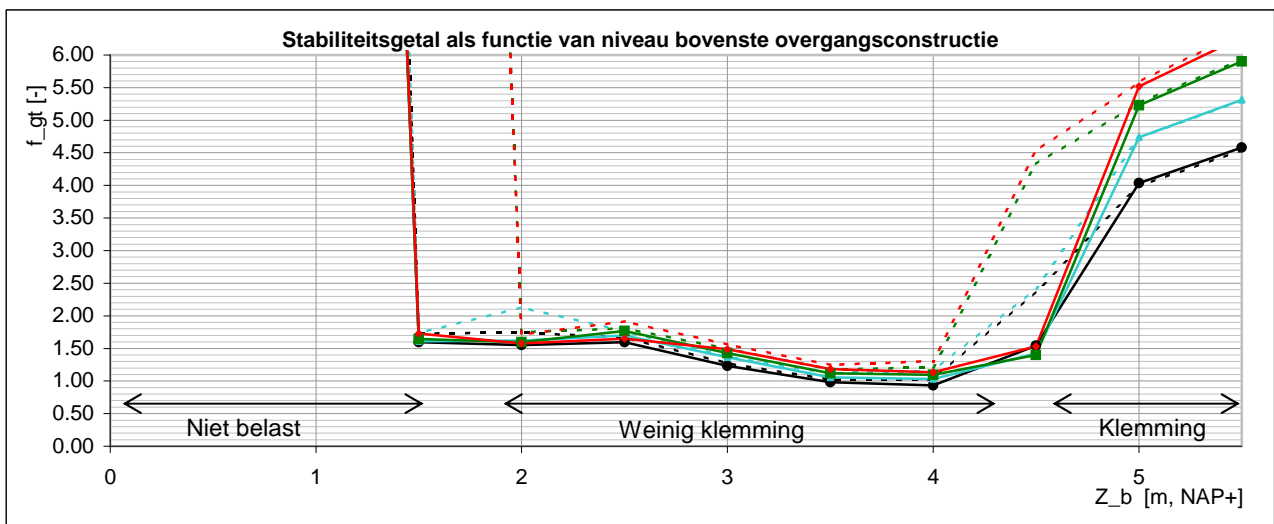
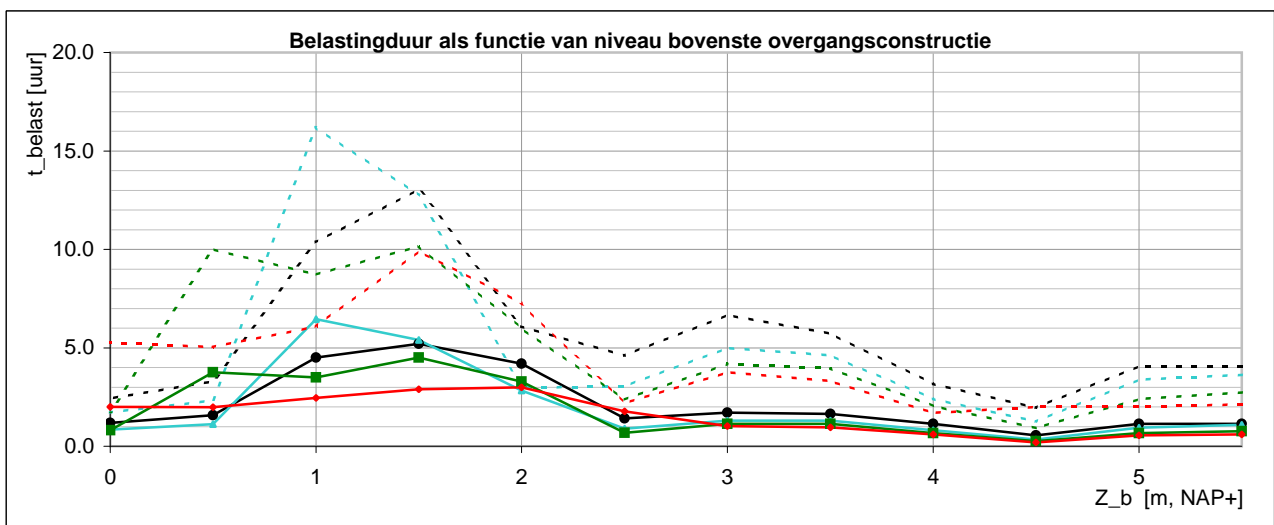
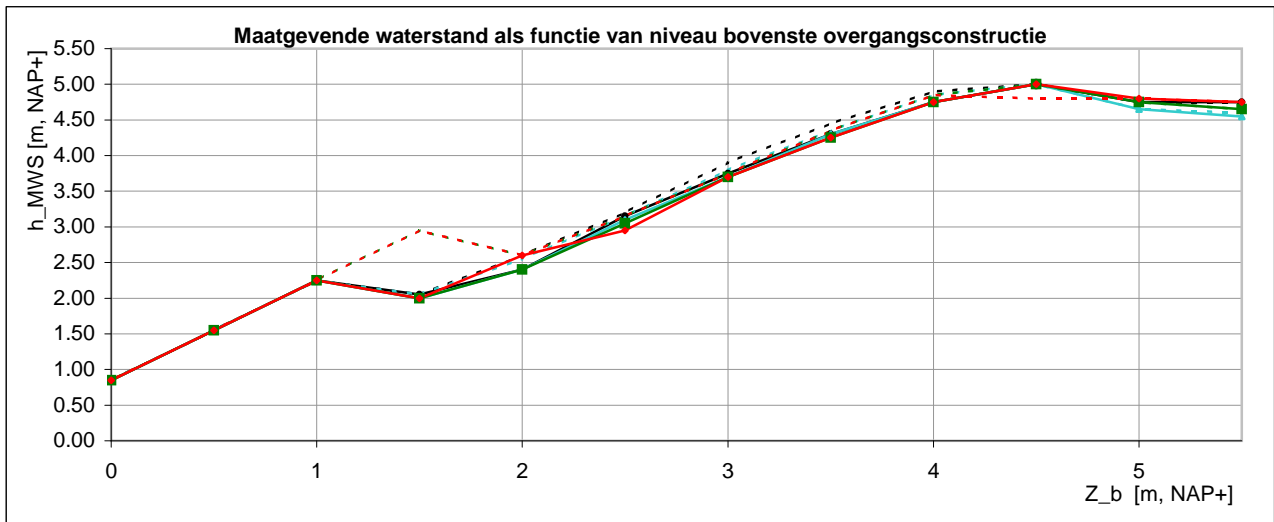
Resultaten Case f

**DELTA**RES

1202551.007

FIG. F.1

**Steenzetting: Betonzuilen**  
 ( $\beta$  verloopt van 0 tot 80 graden)



- St.2008.f - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Involed verlopene golfrichting met de tijd  
 Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$\beta$  van 0° tot 80°

Betonzuilen

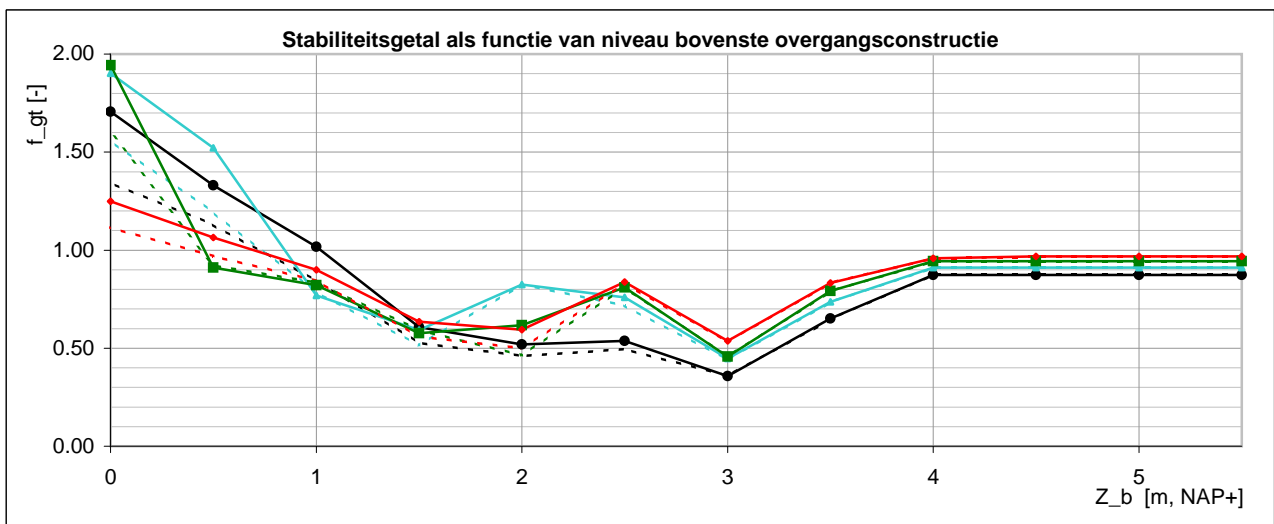
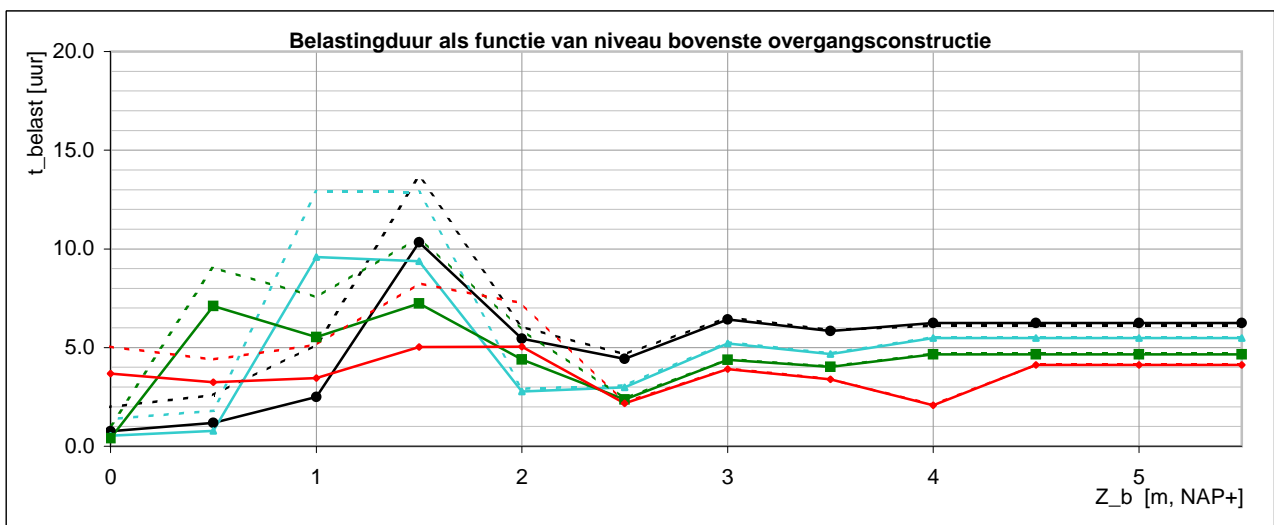
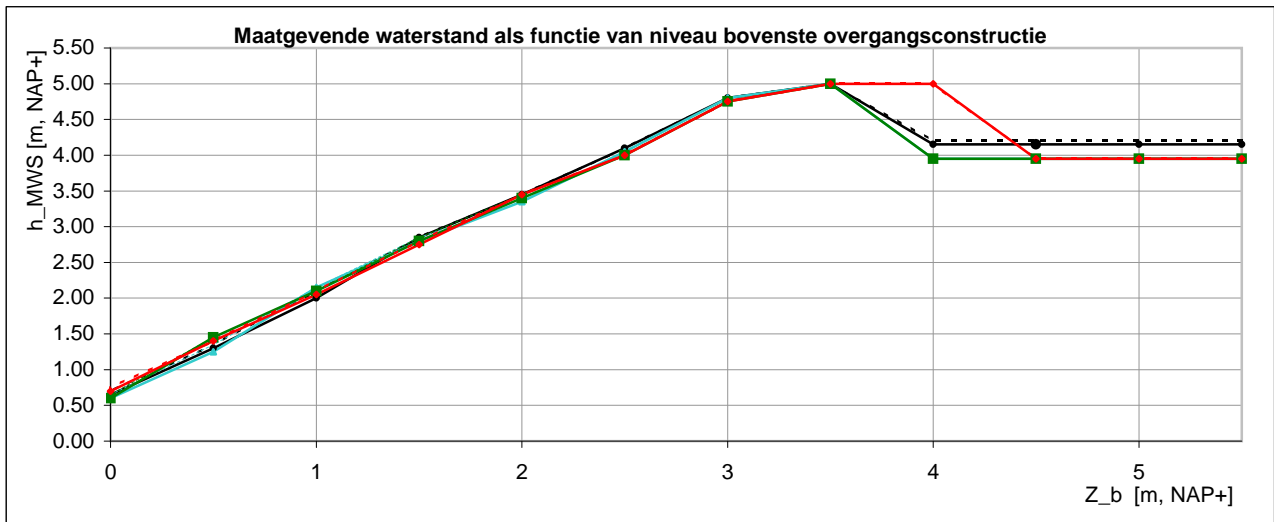
Resultaten Case f

**DELTARES**

1202551.007

FIG. F.2

**Steenzetting: Blokken**  
 ( $\beta$  verloopt van -40 tot 40 graden)



- St.2008.f - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Involed verlopene golfrichting met de tijd  
 Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$\beta$  van -40° tot 40°

Blokken

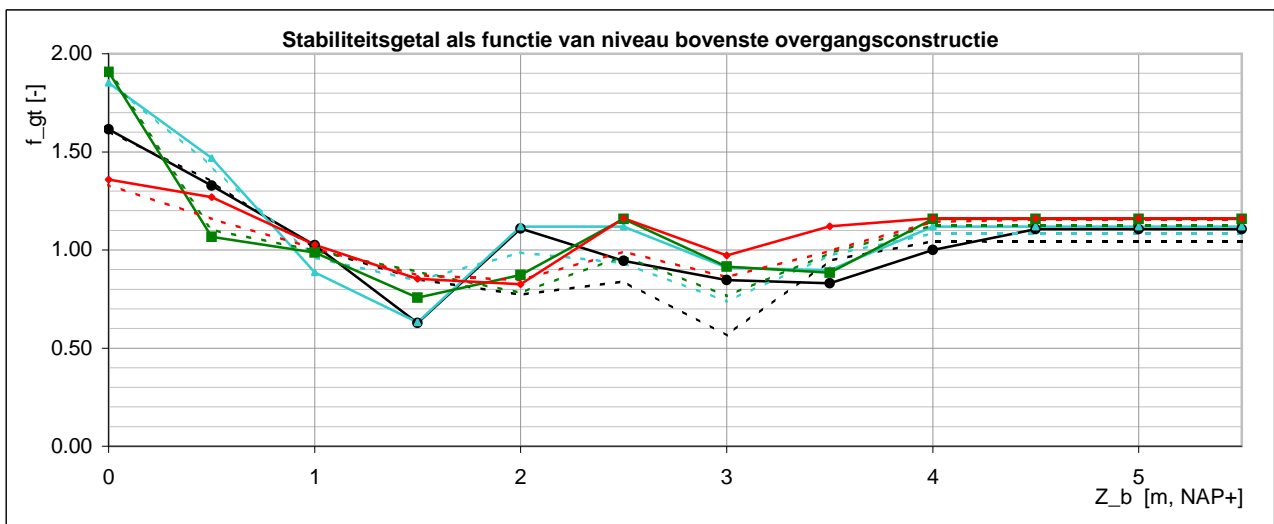
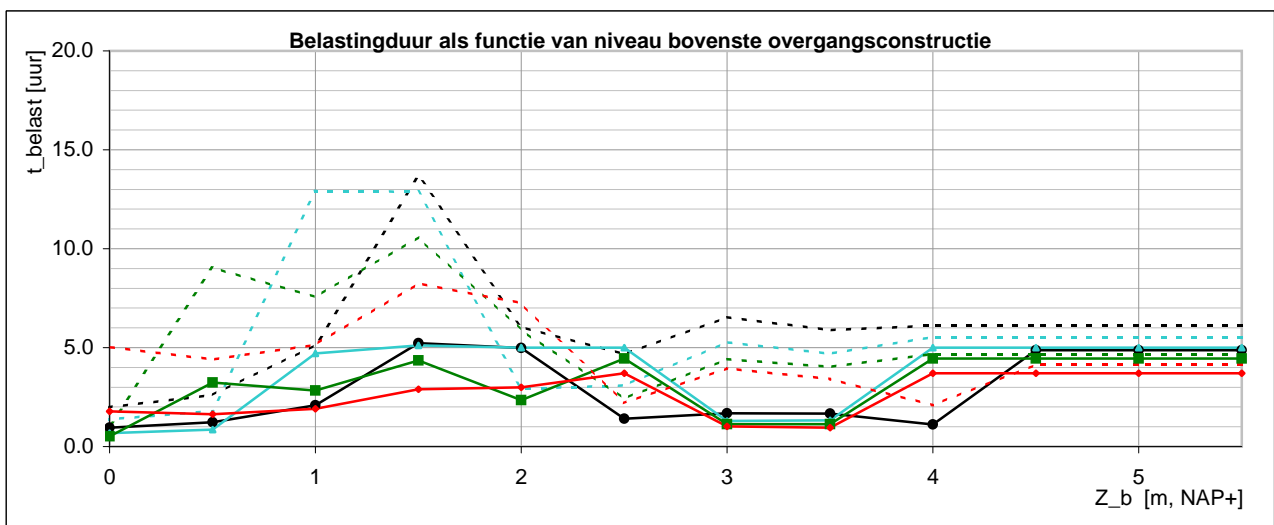
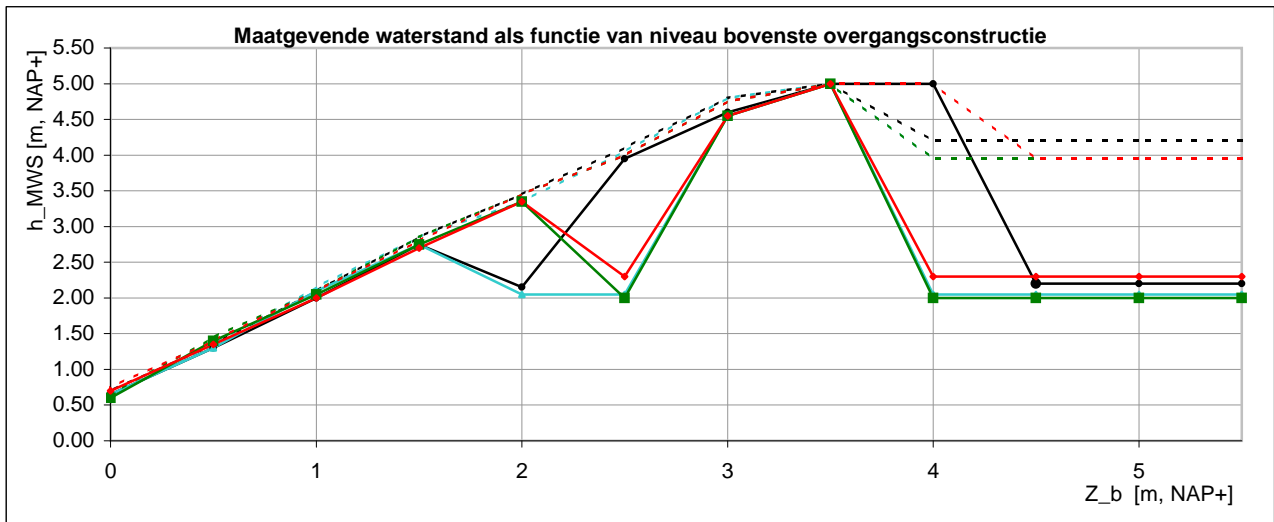
Resultaten Case f

**DELTAIRES**

1202551.007

FIG. F.3

**Steenzetting: Blokken**  
 ( $\beta$  verloopt van 0 tot 80 graden)



- St.2008.f - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- ◆— St.2008.f - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- ◆— ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Involed verlopene golfrichting met de tijd  
 Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$\beta$  van 0° tot 80°

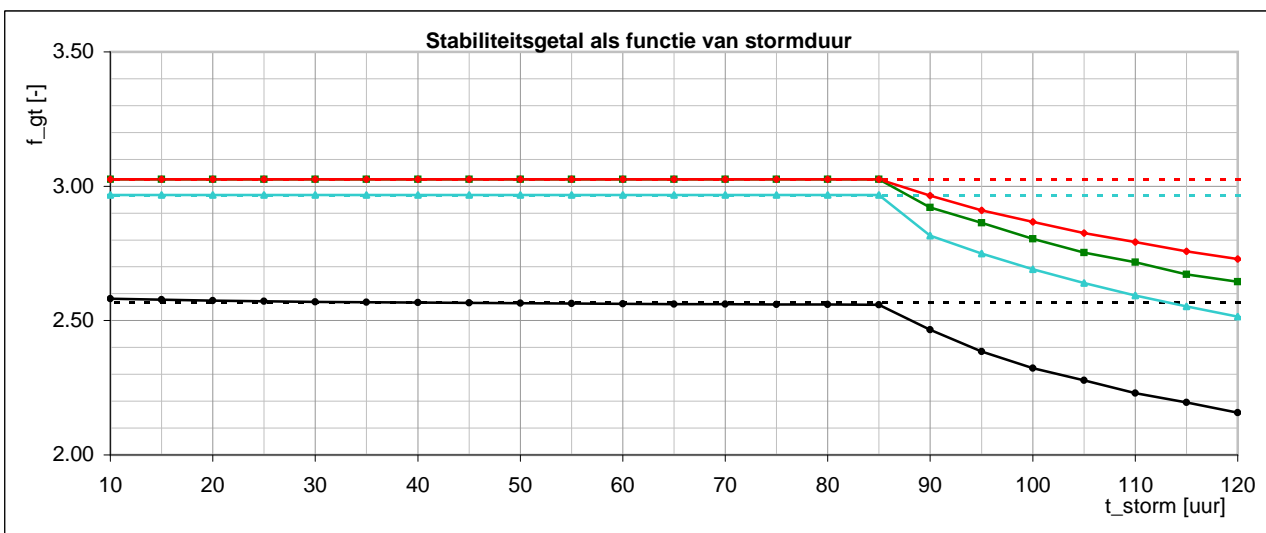
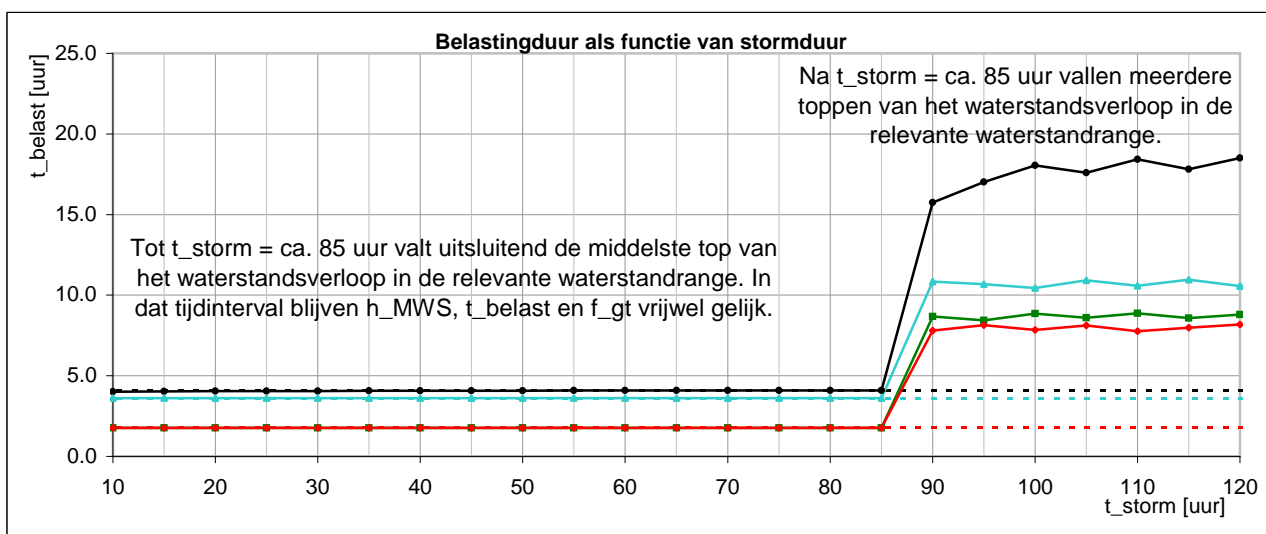
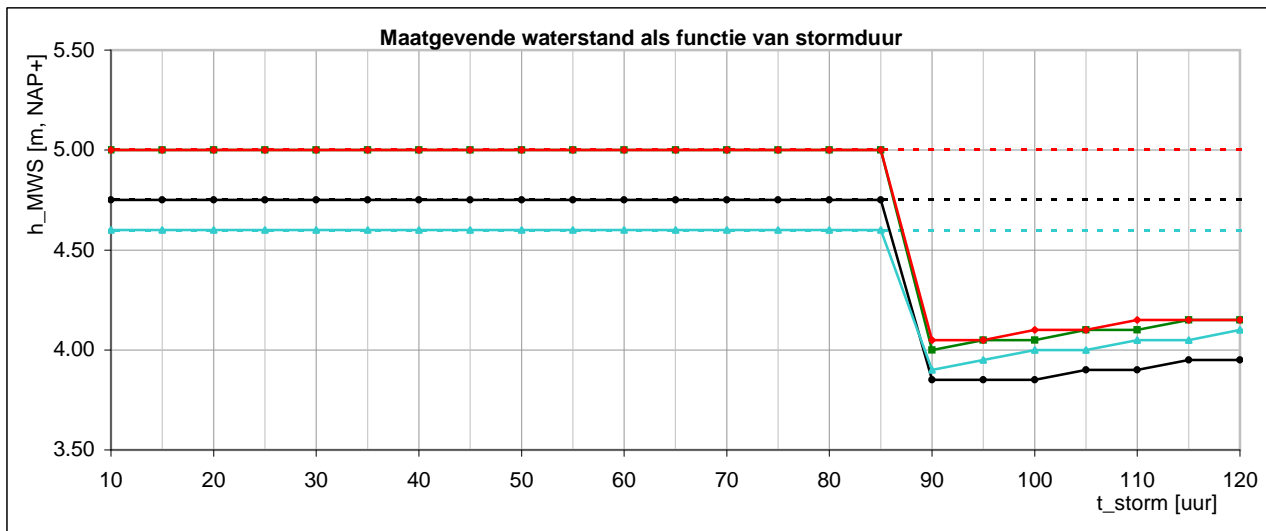
Blokken

Resultaten Case f

**DELTAIRES**

1202551.007

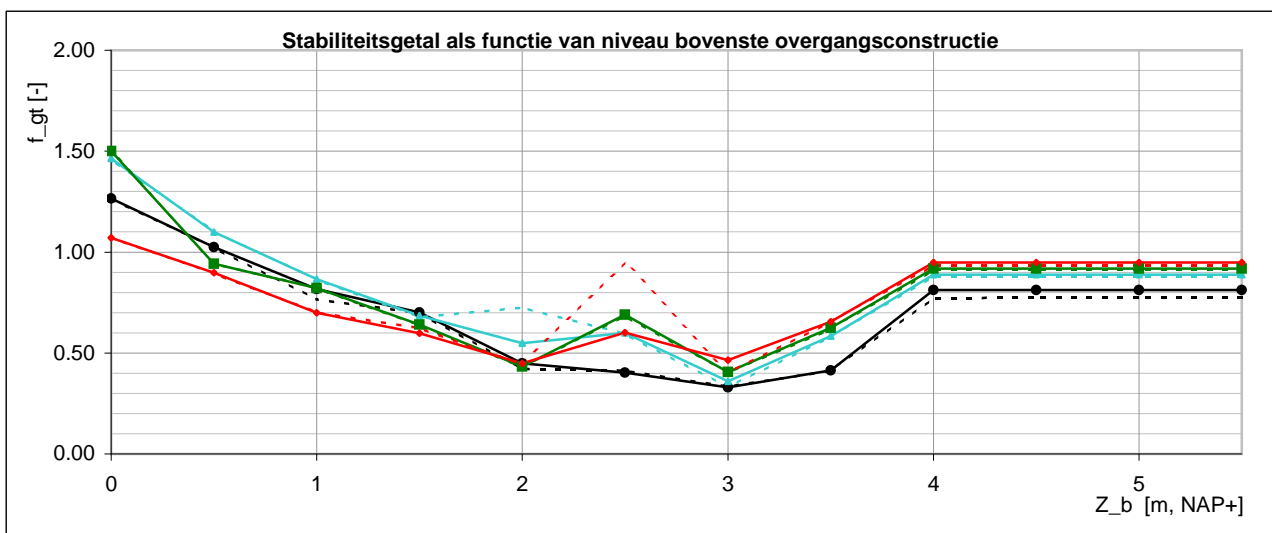
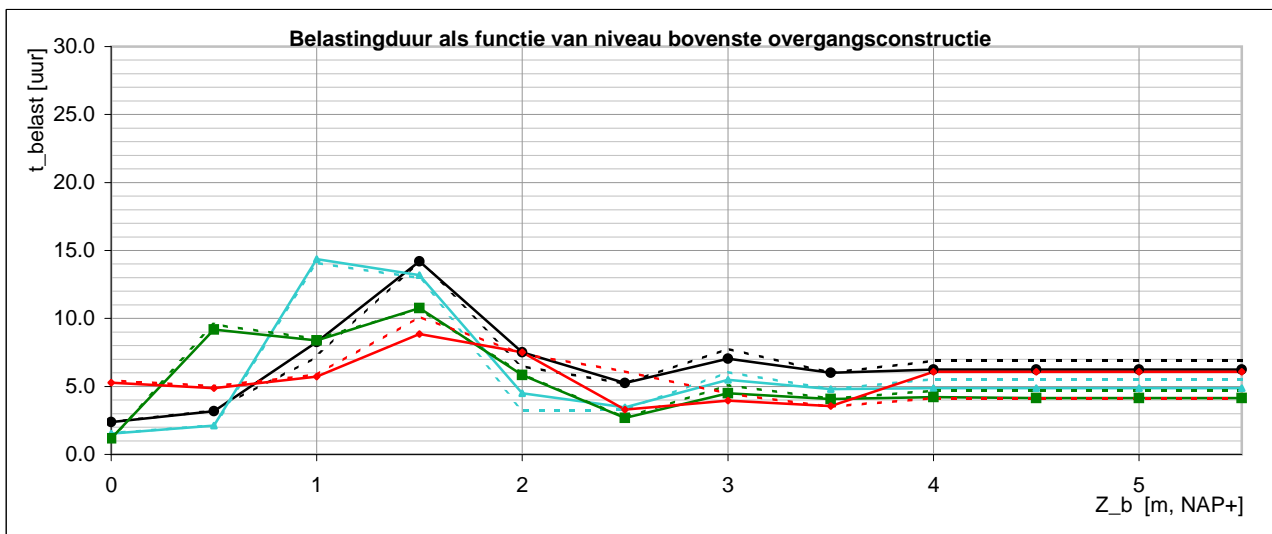
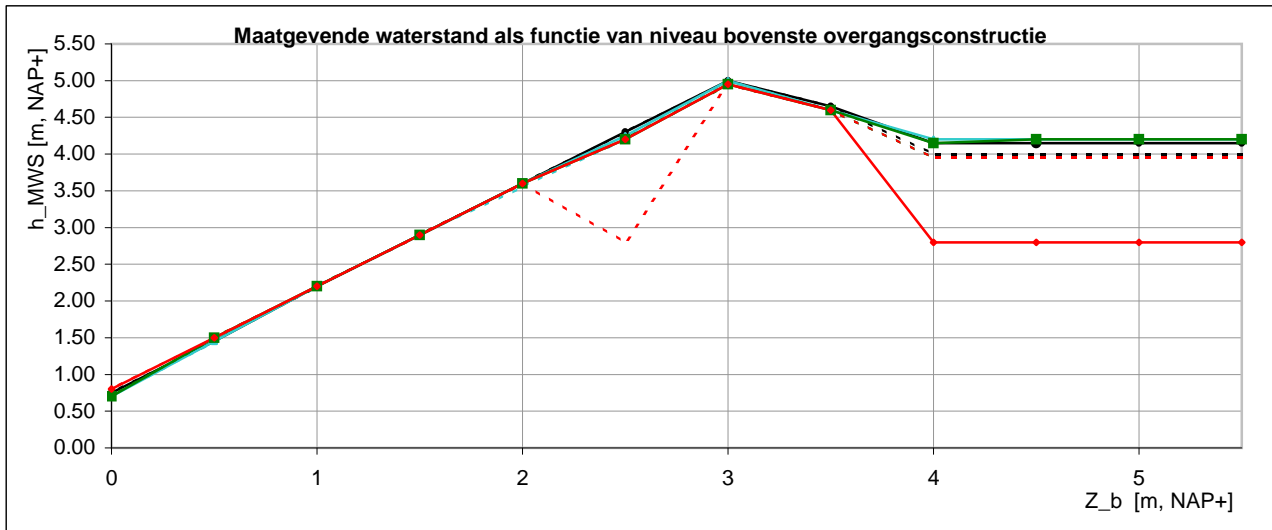
FIG. F.4



- |                                                  |                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.g - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.g - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.g - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.g - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - - ST.2008 - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed variërende stormduur Schematisatie van de belastingduur in Steentoets	Betonzuilen
	Resultaten Case g
<b>DELTAIRES</b>	1202551.007 <span style="float: right;">FIG. G.1</span>

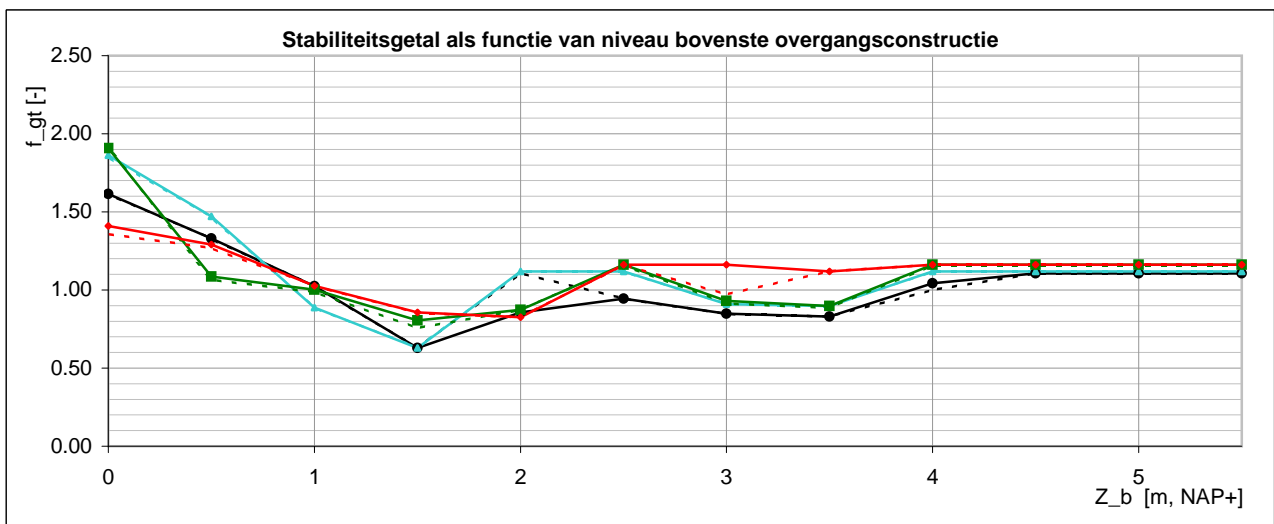
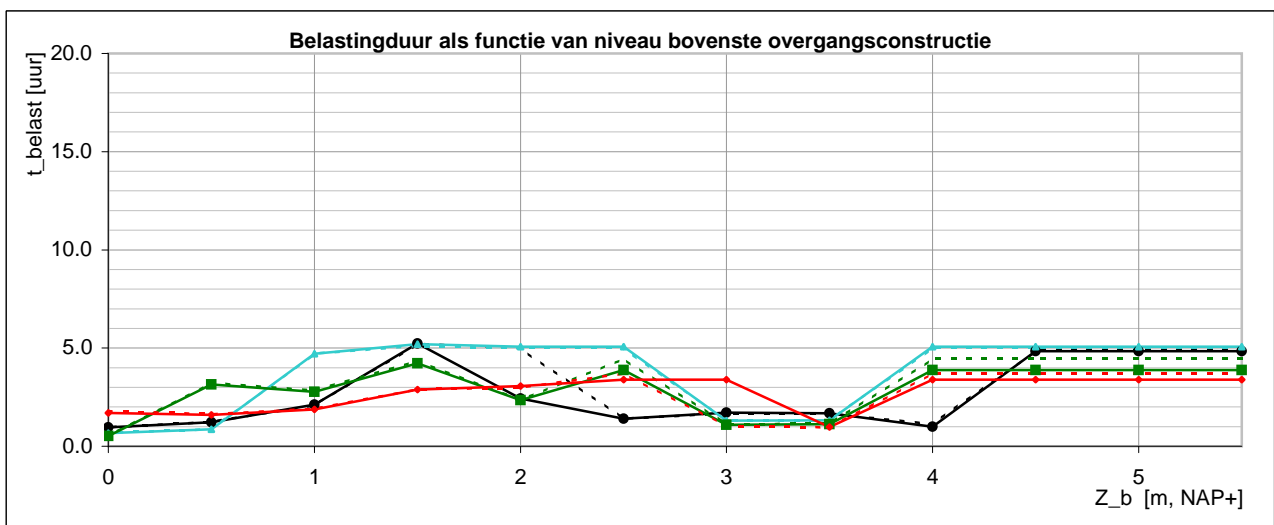
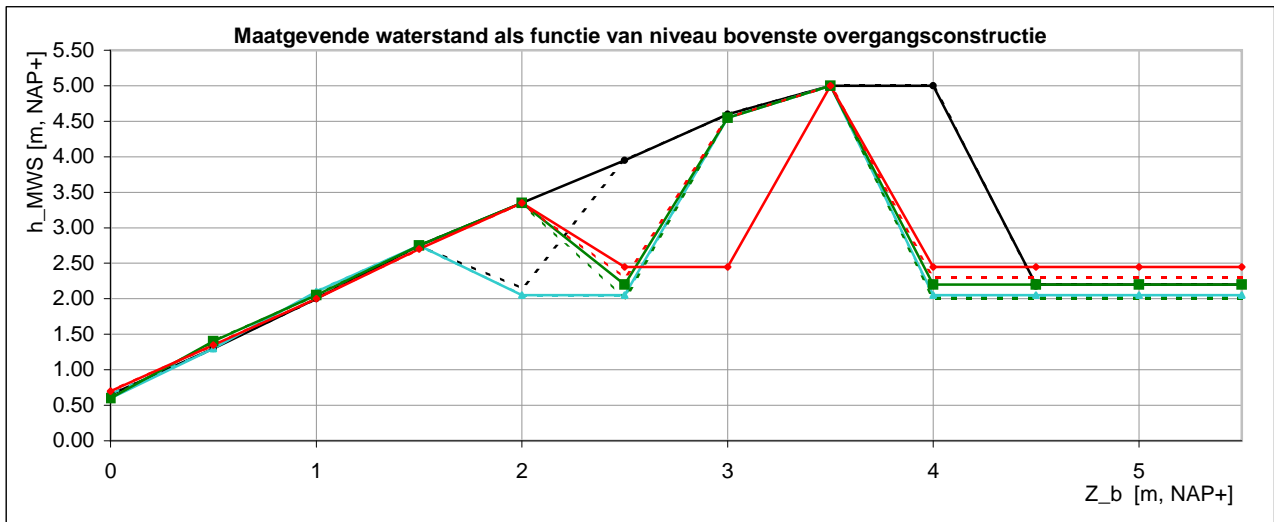
## Steenzetting: Blokken



- |                                                     |                                                      |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| —●— St.2008.h(e) - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m | - - - - St.2008.e - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m |
| —●— St.2008.h(e) - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m | - - - - St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m |
| —■— St.2008.h(e) - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m | - - - - St.2008.e - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m |
| —●— St.2008.h(e) - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m | - - - - St.2008.e - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m |

Invloed vloeiende grenzen relevante waterst.range op resultaten van case e Schematisatie van de belastingduur in Steentoets		Blokken
	Resultaten Case h(e)	
<b>DELTA RES</b>	1202551.007	FIG. H.1

**Steenzetting: Blokken**  
 ( $\beta$  verloopt van 0 tot 80 graden)



- St.2008.h(f) - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- St.2008.h(f) - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- St.2008.h(f) - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- St.2008.h(f) - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m
- - - - St.2008.f - Getijdenrange NAP-0,5m tot +0,5m
- - - - St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,0m tot +1,0m
- - - - St.2008.f - Getijdenrange NAP-1,5m tot +1,5m
- - - - St.2008.f - Getijdenrange NAP-2,0m tot +2,0m

Involed vloeiende grenzen relevante waterst.range op resultaten van case f  
 Schematisatie van de belastingduur in Steentoets

$\beta$  van 0° tot 80°

Blokken

Resultaten Case h(f)

**DELTAIRES**

1202551.007

FIG. H.2



### Dimensionering steenzetting (Betonzuilen)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Q	R	S	T
4	STEENTOETS2008 versie 1.01, Deltares, juni 2009	vlak- nummer	dwars- profiel	Subvalgrenzen randww & vlak	aanleg- jaar	schade in jaar	havendam? (blanco=dijk)	richting op dijk	niveau bi teen	voortland	helling	niveau onder- grens	niveau boven- grens	helling	segmentbreedte (alleen nodig als tan $\alpha$ =0)
5	Westerschelde	1	1	van	1	2	ja/blanko	normaal	[m NAP]	-5	0,01	-5	5,5	0,33	
6	Naam van dijk/vlak	1	2	tot	2	3		op dijk	[m NAP]	-5	0,01	-5	5,5	0,33	
7		1	3		3	4				-5	0,01	-5	5,5	0,33	
8		1	4		4	5				-5	0,01	-5	5,5	0,33	
9		1													
10		1													
11		1													

U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
4	type	TOPLAAG																				
5	toplaag	onderlagen (filter, geotextiel, klei, etc)	D	B	L	spleetbreedte stootvoeg	langsvoeg	oppervlak	open	gaten in steen?	karakt. opening	soortelijke massa	inge- wassen	D15 inwaa- m aantal	goed geklemd?	jaarhee?	havendam	oneffenheden	ingegaten toplaag			
6			[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	jaarhee	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	jaarhee	[mm]	ja/nee?	[m]	[m]	[mm]	[GPa]			
7			0,3	13	13	70	2600							8								
8	27 st ge kl		0,3	13	13	70	2600							8								
9	27 st ge kl		0,3	13	13	70	2600							8								
10	27 st ge kl		0,3	13	13	70	2600							8								
11	27 st ge kl		0,3	13	13	70	2600							8								

AR	AV	AW	AX	AY	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
4	GEO-TEXTIEL																			
5	geotextiel	b	D15	D50	poro- siteit	dikte	doorlatendheid	verval	dijk opbouw	b <sub>ver</sub>	kwaliteit	D90	D90	D15	D50	D90	D15	D50	D90	
6	tussen top- laagen filter?	[m]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[l/(sm <sup>2</sup> )]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/(sm <sup>2</sup> )]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
7		0,15	20	30	0,35	0,1	1	1	kl	0,8	m	0,05	0,09	0,2	0,24	0,32	0,32	0,32		
8	n	0,15	20	30	0,35	0,1	1	1	kl	0,8	m	0,05	0,09	0,2	0,24	0,32	0,32	0,32		
9	n	0,15	20	30	0,35	0,1	1	1	kl	0,8	m	0,05	0,09	0,2	0,24	0,32	0,32	0,32		
10	n	0,15	20	30	0,35	0,1	1	1	kl	0,8	m	0,05	0,09	0,2	0,24	0,32	0,32	0,32		
11	n	0,15	20	30	0,35	0,1	1	1	kl	0,8	m	0,05	0,09	0,2	0,24	0,32	0,32	0,32		

BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY
4	type bovenste overgang (-sconstructie)	ERVARING						
5	>150m brede waterkering op NAP+2,5m	materiaaltransport uit ondergrond	afschuiving	stroming	overgang (-sconstructie)	afstandhouders	Opmerkingen	
6	a0 ... c1	gbr?	gbr?	gbr?	gbr?	gbr?		
7	n	g	g	g	g	g		
8	n	g	g	g	g	g		
9	n	g	g	g	g	g		
10	n	g	g	g	g	g		
11	n	g	g	g	g	g		

### Hydraulische parameters

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
8	gebied: Westerschelde	tabel 1													
9	Locatie	h = NAP+16,00													
10	van	GLW	GHW	toetspeil	stroomsnelheid	h = NAP+12,00	h = NAP+4,00	h = NAP+16,00	h = NAP+18,00						
11	2,00	-0,50	0,50	5,00	2,00	1,00	5,30	1,50	6,50	2,00	7,50	2,50	8,39	Golfrichting	
12	3,00	-1,00	1,00	5,00	2,00	1,00	5,30	1,50	6,50	2,00	7,50	2,50	8,39	van [gr]	tot [gr]
13	4,00	-1,50	1,50	5,00	2,00	1,00	5,30	1,50	6,50	2,00	7,50	2,50	8,39		
14	5,00	-2,00	2,00	5,00	2,00	1,00	5,30	1,50	6,50	2,00	7,50	2,50	8,39		

Hydraulische parameters, eigenschappen en geometrie van steenzetting (betonzuilen)  
Schematisatie van de belastingduur n Steentoets

Betonzuilen  
Geometrie en hydraulische parameters

### Dimensionering steenzetting (Blokken)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Q	R	S	T
4	STEENTOETS2008 versie 1.01, Deltares, juni 2009 (2008.77)														
5	Westerse schelde	Wak- nummer	Subvaalgrenzen randvw. & vlak	van	tot	aanleg- jaar	aanleg- jaar	heavendam? (blanco=dijk)	richting op dijk	niveau bij teen [m NAP]	helling van [m NAP]	niveau onder- grens [m NAP]	niveau boven- grens [m NAP]	helling tan $\alpha$	segmentbreedte (alleen nodig als tan $\alpha$ =0) [m]
6	Naam van dijkvak	2	101	102	103	104	105								
7		2	102	103	104	105									
8		2	103	104	105										
9		2	104	105											
10															
11															

U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
4	type	TOPLAAG														
5	toplaag	onderlagen (filter, geotex- tiel, klei, etc)	D	B	L	spleetbreedte [mm]	open gaten in steen?	open- oppervlak [m <sup>2</sup> ]	jaarnee	ingee- wassen [kg/m <sup>2</sup> ]	soortelijke massa	D15 inwaa- materiaal [mm]	goed geklemd? ja/nee?	oneffenheden havendam [m]	Ingegedten toplaag diepte [m]	VGD [GPa]
6			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n
7			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n
8			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n
9			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n
10			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n
11			0,5	0,3	0,5	1	n	10	2350	n	n	n	n	n	n	n

AR	AV	AW	AX	AY	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	
4	BOVENSTE FILTERLAAG	TWEDE FILTERLAAG																			
5	geotextiel	b	D15	D50	poro- siteit	O90	dikte	doorlatendheid verval	dijkopbouw	b <sub>net</sub>	kwaliteit c1/c2/c3	D50	D90	D15	D50	D90	ZAND	D15	D50	D90	
6	tussen top- laag en filter?	[m]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[l/s/m <sup>2</sup> ]	[mm]	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk	gk
7		0,1	8	15	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8		0,1	8	15	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9		0,1	8	15	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10		0,1	8	15	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11		0,1	8	15	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY
4	type bovenste overgang (-sconstructie) op NAP+2,5m	ERVARING						
5	>150m brede waterkering	materiaaltransport	atrschuiving	stroming	overgang (-sconstructie)	Opmerkingen		
6		uit ondergrond	uit granulaire laag	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?
7	a0...c1	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?	glo/?
8	B0	?	?	?	?	?	?	?
9	B0	?	?	?	?	?	?	?
10	B0	?	?	?	?	?	?	?
11	B0	?	?	?	?	?	?	?

### Hydraulische parameters

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
8	gebied: Westerse schelde	tabel 1													
9	Locatie	stormduur: 35													
10	van	GLW [m+NAP]	GHW [m+NAP]	toetspeil HR2006	stroomsnelheid m/s	h = NAP+2,00 Hs [m]	h = NAP+4,00 Hs [m]	h = NAP+8,00 Hs [m]	h = NAP+16,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]	h = NAP+18,00 Hs [m]
11	102,00	0,50	0,50	5,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50
12	103,00	-1,00	1,00	5,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50
13	104,00	-1,50	1,50	5,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50
14	104,00	-2,00	2,00	5,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50

Hydraulische parameters, eigenschappen en geometrie van steenzetting (blokken)  
Schematisatie van de belastingduur n Steentoets

Blokken

Geometrie en hydraulische parameters