

Hydraulische randvoorwaarden voor Ameland en de Friese kust

Joana van Nieuwkoop
Alfons Smale

1204042-000

Titel

Hydraulische randvoorwaarden voor Ameland en de Friese kust

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Wetterskip Fryslân	1204042-000	1204042-000-HYE-0004	82

Trefwoorden

HR, Ameland, Friese kust, RAND2001 database, Hydra-K, bekleding

Samenvatting

In het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) wordt op Ameland en langs de Friese kust gewerkt aan dijkversterking van een aantal dijkvakken. Voor deze werkzaamheden heeft het Wetterskip Fryslân behoefte aan Hydraulische Randvoorwaarden, die beter aansluiten bij de laatste inzichten dan de HR2006 of deterministisch bepaalde randvoorwaarden.

In dit rapport worden indicatieve Hydraulische Randvoorwaarden voor het toetsen van de waterkeringen van Ameland en de Friese kust gepresenteerd, welke met behulp van Hydra-K in combinatie met een aangepaste RAND 2001 database zijn bepaald. Ook worden indicatieve ontwerprandvoorwaarden afgegeven, waarbij een robuustheidstoeslag is toegepast en rekening is gehouden met zeespiegelrijzing.

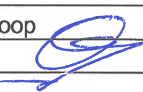


Daarnaast zijn Hydraulische toetsrandvoorwaarden bij lagere waterstanden bepaald voor zowel Ameland als de Friese Kust. Ook hiervoor is het probabilistische programma Hydra-K gebruikt met de zogenaamde aangepaste Q-variant. De resultaten van de Hydra-K berekeningen voor lagere taluddelen zijn conform Deltares (2011) aangepast.

Tot slot is gekeken naar het effect van een eventuele landwaartse geulmigratie van het Borndiep op de hydraulische toetsrandvoorwaarden van dijkvak '0' en '1' langs de kust van Ameland. De invloed van de landwaartse geulmigratie is in kaart gebracht door de golfcondities op verschillende afstanden van de geulrand van het Borndiep te bepalen met het golfmodel SWAN. Met behulp van deze informatie is voor beide dijkvakken voor twee migratie scenario's aangegeven hoeveel de golfhoogte zal toenemen.

Referenties

Aangepaste offerte Hydraulische Randvoorwaarden Ameland, kenmerk 1204042-000-HYE-0002,

Opdracht voor bepaling van de Hydraulische Randvoorwaarden voor Ameland, kenmerk WFN1017493.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	jan. 2011	J.C.C. van Nieuwkoop A.J. Smale		F.L.M. Diermanse		M.R.A. van Gent	
2	feb. 2011	J.C.C. van Nieuwkoop A.J. Smale		J.V.L. Beckers		M.R.A. van Gent	
3	mrt. 2011	J.C.C. van Nieuwkoop A.J. Smale		J.V.L. Beckers 		M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling en aanpak	3
1.4	Leeswijzer	4
2	Beschrijving probabilistische berekening	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Hydra-K	5
2.3	Hydra-K met aangepaste Q-variant voor bekledingen	6
2.4	SWAN database	7
2.5	Dijkprofielen	8
3	Hydraulische toets-randvoorwaarden Ameland	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Standaard dijkprofiel	12
3.3	Werkelijke dijkprofiel	12
3.4	Beoogde dijkprofiel	13
3.5	Vergelijking Hydra-K berekeningen met HR2006 en deterministisch bepaalde HR	13
4	Hydraulische toets-randvoorwaarden Friese kust	17
4.1	Inleiding	17
4.2	Standaard dijkprofiel	19
4.3	Werkelijk dijkprofiel	21
4.4	Vergelijking Hydra-K berekeningen met HR2006	22
5	Hydraulische ontwerp-randvoorwaarden	25
6	Hydraulische toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden	29
6.1	Inleiding	29
6.2	Algemene toelichting toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden	29
6.3	Vergelijking met randvoorwaarden voor hoogte (golfoverslag) bij toetspeil	32
6.4	Toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden voor Ameland	32
6.5	Toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden voor de Friese kust	34
6.6	Afleiden van ontwerprandvoorwaarden bij lagere waterstanden	35
7	Effect geulmigratie Borndiep	37
7.1	Inleiding	37
7.2	SWAN model	37
7.3	Significante golfhoogte in relatie tot de afstand tot de geul	39
8	Conclusies	41
8.1	Inleiding	41
8.2	Conclusies Hydraulische Randvoorwaarden	41
8.3	Conclusies Hydraulische Randvoorwaarden bij lage waterstanden	42
8.4	Conclusies effect geulmigratie	42

9 Referenties	43
Bijlage(n)	
A Dijkprofielen Ameland en de Friese kust	A-1
B Tabellen randvoorwaarden bij lage waterstanden	B-1
C Definition of spectral measures	C-1
C.1 Mean period measures	C-1
C.2 The block peak period T_{pb}	C-1
C.3 Equivalent period measures for double peaked spectra	C-2
C.4 Peak period T_{pm}	C-2

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Wetterskip Fryslân beheert ongeveer 190 kilometer primaire waterkeringen. Dat zijn dijken langs de Waddenzee en het IJsselmeer en duinen op de Waddeneilanden. Primaire waterkeringen die bij de zesjaarlijkse Toetsing op Veiligheid niet meer aan de wettelijke veiligheidsnormen voldoen, moet het waterschap verbeteren. Daarvoor is het landelijke Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) in het leven geroepen.

In het kader van dit Hoogwaterbeschermingsprogramma wordt op Ameland en langs de Friese kust gewerkt aan dijkversterking van een aantal dijkvakken. De benodigde dijkversterking hangt sterk af van de te hanteren Hydraulische Randvoorwaarden voor deze dijkvakken. In eerste instantie is daarbij gebruik gemaakt van deterministisch bepaalde randvoorwaarden, wat inhoudt dat uitgaande van de windsnelheid en waterstand bij de geldende normfrequentie de golfcondities langs de waterkeringen worden bepaald. Per dijkvak wordt vervolgens het maximum van deze condities over alle windrichtingen genomen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat sommige combinaties van golven en waterstanden een uiterst kleine kans van voorkomen hebben. Dit betekent dat de deterministische aanpak leidt tot randvoorwaarden die conservatief (d.w.z. te hoog) zijn, met name voor zuidoostelijk georiënteerde keringen in de Waddenzee.

In oktober 2011 zullen concept Hydraulische Randvoorwaarden voor de vierde toetsronde (2011-2016) beschikbaar komen. De toegepaste methoden en technieken voor het berekenen van de HR2011 zijn gebaseerd op de laatste inzichten en komen voort uit meerjarige onderzoeksprogramma's zoals 'Sterkte en Belasting Waterkeringen' (SBW) en 'Wettelijk Toets Instrumentarium' (WTI). Op basis van voorlopige resultaten is duidelijk geworden dat de huidige Hydraulische Randvoorwaarden inderdaad conservatief zijn. Echter, de HR2011 zullen pas eind 2011 officieel worden vastgesteld door de staatssecretaris en tot die tijd kan er nog geen gebruik worden gemaakt van het nieuwe instrumentarium en de nieuwe randvoorwaarden.

1.2 Probleemstelling

Het Wetterskip Fryslân heeft behoefte aan Hydraulische Randvoorwaarden, die beter aansluiten bij de laatste inzichten. Omdat de dijkversterkingprogramma's voor Ameland en de Friese kust reeds gestart zijn, is het niet mogelijk om te wachten totdat de HR2011 officieel gebruikt kunnen worden.

Het is wel mogelijk om voorlopige Hydraulische Randvoorwaarden af te leiden op basis van het probabilistische rekenprogramma Hydra-K. In dit programma wordt de statistiek van wind en waterstand vertaald naar de golfcondities bij de teen van de dijk. Deze vertaling vindt plaats met een vertalingsmatrix van golfcondities, die het resultaat is van een groot aantal berekeningen met het spectrale golfmodel SWAN. De rekenresultaten zijn opgeslagen in een database. Omdat de nieuwe database nog niet beschikbaar is, wordt teruggevallen op de RAND2001 database, waarin SWAN resultaten uit 1999 zijn opgeslagen. Op basis van hindcast studies in de Waddenzee kan geconcludeerd worden dat de destijds gebruikte SWAN versie de werkelijk optredende golfhoogte en golfperiode gemiddeld 10% onderschat. Om deze reden worden zowel de H_{m0} als de $T_{m-1,0}$ in de RAND2001 database gecorrigeerd met 10%. Dit betreft een correctie voor de modelfouten van de gehanteerde SWAN versie.

Daarnaast is in Deltares (2010a) en Deltares (2010b) geconstateerd dat de met Hydra-K berekende maatgevende golfcondities voor de Texelse harde keringen afhankelijk zijn van het in de berekening gebruikte dijkprofiel. Voor Ameland en de Friese kust zou deze afhankelijkheid ook kunnen spelen. Om erachter te komen of bij de profielafhankelijkheid ook speelt bij Ameland en de Friese kust, is het nodig om de Hydraulische Randvoorwaarden zowel voor het standaardprofiel als voor het werkelijke en het beoogde profiel te berekenen.

Verder speelt dat taludbekleding momenteel getoetst en ontworpen wordt met behulp van golfcondities behorende bij het toetspeil. Sinds begin januari 2011 is het mogelijk om met het probabilistische rekenprogramma Hydra-K realistische randvoorwaarden voor de lagere delen van het talud, waar maatgevende waterstanden lager kunnen zijn dan het toetspeil, te kunnen bepalen en dit wordt dan ook gevraagd door het Wetterskip Fryslân voor de dijkvakken op Ameland en een aantal dijkvakken langs de Friese kust.

Tot slot is er onzekerheid over de te gebruiken Hydraulische Randvoorwaarden voor dijkvakken '0' en '1' op Ameland. Aan de westzijde van Ameland bevindt zich namelijk de getijdegeul Borndiep. Deze geul is onderdeel van het dynamische morfologische systeem van de Waddenzee. Als gevolg van de morfologische dynamiek lijkt de geul zich oostwaarts (richting Ameland) te verplaatsen. De migratie van de geul leidt tot een verdieping van de bodem juist voor de dijkvakken '0' en '1'. De verdieping kan leiden tot een toename van de hydraulische belasting op deze dijkvakken, doordat golven komende vanuit het (noord) westen later de bodem voelen en daardoor mogelijk hoger zijn. Om de risico's te kunnen inschatten heeft het Wetterskip Fryslân behoefte aan inzicht in het mogelijke effect van het migreren van de geul op de Hydraulische Randvoorwaarden.

Samengevat heeft het Wetterskip Fryslân behoefte aan:

- Bepaling van probabilistische hydraulische toets- en ontwerprandvoorwaarden, die beter aansluiten bij de laatste inzichten, voor de dijkvakken op Ameland en een aantal dijkvakken langs de Friese kust;
- Bepaling van probabilistische hydraulische toetsrandvoorwaarden voor de dijkvakken op Ameland en een aantal dijkvakken langs de Friese kust bij lagere waterstand;
- Bepaling van het effect van geulmigratie van het Borndiep op de hydraulische toetsrandvoorwaarden.

In dit rapport worden zowel hydraulische **toets-** als hydraulische **ontwerprandvoorwaarden** gepresenteerd. De toetsrandvoorwaarden gerapporteerd in deze rapportage betreffen indicatieve toetsrandvoorwaarden en moeten niet verwart worden met de HR2011. Hydraulische toetsrandvoorwaarden worden gebruikt om een periodieke veiligheidstoetsing van een waterkering uit te voeren. De tijdshorizon van **toetsrandvoorwaarden** is dan ook in de orde van 5 jaar. **Ontwerprandvoorwaarden** worden gebruikt om een waterkering voor een bepaalde levensduur te ontwerpen, bijvoorbeeld 50 jaar. Bij een dergelijke tijdshorizon moet rekening gehouden met ontwikkelingen die belasting en sterkte van de waterkering gedurende die periode beïnvloeden. Om de **ontwerprandvoorwaarden** te berekenen worden dan ook toeslagen voor bijvoorbeeld robuustheid en klimaat bij de **toetsrandvoorwaarden** opgeteld.

1.3 Doelstelling en aanpak

Om antwoord te geven op de verschillende vragen van het Wetterskip Fryslân zijn drie verschillende doelstellingen gespecificeerd. Per doel is een korte beschrijving van de aanpak gegeven.

Voorlopige Hydraulische Randvoorwaarden

Het eerste doel van deze studie is om met een probabilistische aanpak (Hydra-K) voorlopige Hydraulische Randvoorwaarden te bepalen voor:

- Dijkvakken 0 tot en met 6 aan de Waddenzee-zijde van Ameland op basis van de standaard dijkprofielen, de werkelijke dijkprofielen en de beoogde dijkprofielen.
- Dijkvakken 23, 24, 31 tot en met 42 langs de Friese kust op basis van de standaard dijkprofielen en de werkelijke dijkprofielen.

De berekeningen worden uitgevoerd met een gecorrigeerde RAND2001 database. Een correctie van 10% op de significante golfhoogte H_{m0} en de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ is toegepast om rekening te houden met modelfouten in de SWAN-versie gebruikt voor het opstellen van de RAND2001 database. Ontwerprandvoorwaarden voor keringen kunnen hiervan worden afgeleid door correcties voor zeespiegelstijging en robuustheidstoelagen toe te passen. De robuustheidstoelagen worden opgeteld bij de resultaten van de Hydra-K berekeningen met de gecorrigeerde RAND2001 database en de beoogde dijkprofielen in het geval van Ameland en het huidige profiel in het geval van de Friese kust. Tot slot wordt ook rekening gehouden met klimaatscenario's.

Hydraulische Randvoorwaarden bij lagere waterstanden

Het tweede doel van deze studie is om met een probabilistische aanpak (Hydra-K) Hydraulische Randvoorwaarden bij lagere waterstanden af te leiden voor:

- Dijkvakken 0 tot en met 6 aan de Waddenzee-zijde van Ameland op basis van de bekleding van de werkelijke dijkprofielen en de beoogde dijkprofielen.
- Dijkvakken 23, 24, 31 tot en met 42 langs de Friese kust op basis van de bekleding van de werkelijke dijkprofielen. Wetterskip Fryslân zit hier nog in de fase van vooronderzoek. Dit betekent dat er nog geen beoogde dijkprofielen zijn waarvoor randvoorwaarden moeten worden bepaald.

De Hydraulische Randvoorwaarden worden afgeleid voor een aantal waterstanden: van NAP +0,00 meter met stappen van 0,50 meter tot het toetspeil voor de drie bekledingstypen gras, asfalt en betonblokken.

Effect geulmigratie Borndiep

Het derde doel van deze studie is om het effect te bepalen van geulmigratie van het Borndiep op de Hydraulische Randvoorwaarden van dijkvak '0' en '1' langs de kust van Ameland.

De invloed van de geulmigratie wordt in kaart gebracht door de golfcondities op verschillende afstanden van het Borndiep te bepalen met het golfmodel SWAN. Met SWAN wordt één berekening gemaakt met aansturing conform de Hydraulische Randvoorwaarden voor dijkvak '0' met het huidige dwarsprofiel. De golfcondities worden bepaald bij (1) de teen van de dijk, (2) de originele geulwand ter plaatse van de laagwaterlijn en (3) halverwege punten (1) en (2). De hieruit volgende informatie wordt gebruikt om het effect van landwaartse geulmigratie van het Borndiep op de Hydraulische Randvoorwaarden te bepalen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de probabilistische methode beschreven waarmee de Hydraulische Randvoorwaarden worden berekend. In de hoofdstukken 3 en 4 worden de resultaten gepresenteerd van de berekeningen van de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) voor respectievelijk Ameland en de Friese kust. De resultaten worden vergeleken met de geldende HR2006 en tevens met deterministische randvoorwaarden. Vervolgens gaat hoofdstuk 5 in op de benodigde toeslagen om ontwerprandvoorwaarden af te leiden. In hoofdstuk 6 worden de Hydraulische Randvoorwaarden bij lagere waterstanden gegeven voor zowel Ameland als de Friese kust. In hoofdstuk 7 wordt het effect van de geulmigratie van het Borndiep op de Hydraulische Randvoorwaarden van Ameland behandeld. Tenslotte worden in hoofdstuk 8 de conclusies van de verschillende vraagstukken samengevat.

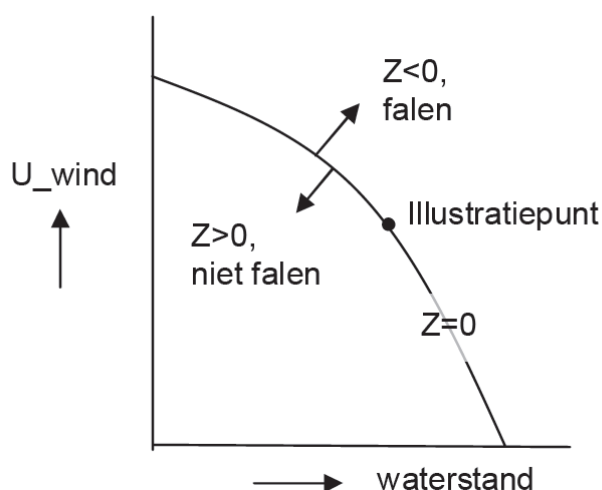
2 Beschrijving probabilistische berekening

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de probabilistische rekenmethode voor het bepalen van de maatgevende golfcondities voor zeedijken. Voor dit doeleinde wordt het probabilistische model Hydra-K gebruikt, dat hieronder globaal wordt beschreven. Uitgebreide informatie over Hydra-K is onder andere te vinden in RIKZ (2006).

2.2 Hydra-K

Hydra-K berekent de kans op falen van waterkeringen langs de Nederlandse kust ten behoeve van de wettelijke toetsing. Er zijn verschillende mechanismen die het bezwijken van keringen kunnen veroorzaken, zoals golfoploop/overslag, instabiliteit van de dijkbekleding of instabiliteit van het dijklichaam. Voor de meeste van deze faalmechanismen is in Hydra-K een betrouwbaarheidsfunctie $Z=R-S$ geïmplementeerd die sterkte van de kering (R) vergelijkt met de hydraulische belasting (S). De belasting is een functie van de belastingvariabelen. Als Z kleiner is dan 0 ($Z<0$) treedt falen op. Een voorbeeld met belastingvariabelen waterstand en windsnelheid is schematisch weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Schematische weergave van een faalgebied voor belastingvariabelen waterstand en windsnelheid.

Met een probabilistische methode kan de faalkans van een waterkering worden berekend door de kans te integreren over het faalgebied $Z<0$, dus over alle combinaties van waterstand en windsnelheid die leiden tot falen. Hydra-K gebruikt hiervoor 'opgeschaalde' observaties van de belastingvariabelen windsnelheid, windrichting en waterstand van stormen uit het verleden. Elke combinatie van wind en waterstand heeft een kans van optreden. Elke combinatie wordt vertaald naar een belasting bij de waterkering (waterstand en golfcondities) met behulp van het golfmodel SWAN. Vervolgens wordt bepaald of deze combinatie leidt tot falen.

Het model Hydra-K kan behalve een faalkans van een gegeven waterkering ook een ontwerpberekening uitvoeren. Hierbij ligt de faalkans vast op de gewenste normfrequentie. Voor Ameland is dit $1/2000^e$ per jaar en voor de Friese kust is dit $1/4000^e$ per jaar. De ligging

van de faalgrens ($Z=0$) kan worden aangepast door de sterkte van de kering, bijvoorbeeld de kruinhoogte, te variëren. De faalgrens wordt net zo lang verschoven totdat de faalkans precies de gewenste waarde heeft. Vervolgens wordt het punt op de faalgrens opgezocht dat de grootste kans van optreden heeft. Dit wordt het eerste illustratiepunt IP1 genoemd. Voor de hydraulische randvoorwaarden HR wordt een tweede illustratiepunt IP2 bepaald. Dat is het punt op de faalgrens met de grootste kans van optreden en waarbij de waterstand gelijk is aan het toetspeil. De benodigde kruinhoogte, behorende bij IP1 en IP2 zijn gelijk. De golfcondities (H_{m0} en $T_{m-1,0}$) uit het IP2 worden gepubliceerd in het randvoorwaardenboek. Ook in de onderhavige studie worden golfcondities behorend bij IP2 berekend.

Ten behoeve van de berekeningen van de HR2011 in de Waddenzee zijn momenteel de Hydra-K en SWAN modellen getest en gevalideerd. Recent zijn in het kader van het project WTI (Wettelijk Toets Instrumentarium) indicatieve randvoorwaarden voor de Waddenzee bepaald op basis van een nieuwe versie van Hydra-K (versie 3.5.4) en een wat oudere database met SWAN berekeningen, KustDB2006 (zie paragraaf 2.4). De Hydra-K versie is feitelijk de vigerende versie 3.5.1, die gebruikt is om de HR2006 af te leiden, met enkele aanpassingen aan de user-interface (versie 3.5.3) en de toegevoegde Waddenzeefunctionaliteit.

In de huidige studie worden de berekeningen voor de Hydraulische Randvoorwaarden voor Ameland en de Friese kust uitgevoerd met Hydra-K versie 3.5.4. Het gebruikte faalmechanisme voor de bepaling van maatgevende golfcondities is golfoverslag en het faal criterium is een overslagdebiet van 1 l/m/s. Dit is een gangbaar faalmechanisme voor het bepalen van randvoorwaarden voor de toetsing op hoogte. Genoemde versie wordt ook toegepast in WTI 2011 voor bovenstaand faalmechanisme.

2.3 Hydra-K met aangepaste Q-variant voor bekledingen

Voor het faalmechanisme golfoverslag vindt de maximale belasting doorgaans plaats op of rond het moment dat de waterstand maximaal is. Voor het faalmechanisme stabiliteit van bekledingen is dit niet het geval, vooral niet voor de lagere delen van het dijkprofiel. De lagere delen van een dijkprofiel kunnen op het moment van de hoogste waterstand namelijk onder de stilwaterlijn liggen en worden op dat moment minder zwaar belast. Sinds begin januari 2011 is een nieuwe versie van Hydra-K beschikbaar (versie 3.6.1). In deze versie is de aangepaste Q-variant ingebouwd, die het mogelijk maakt om per waterstand (dus niet alleen voor het toetspeil) golfcondities op verschillende bekledingen probabilistisch te berekenen (Deltares, 2011).

Wanneer het faalmechanisme instabiliteit bekleding wordt gekozen, kan er uit verschillende types bekleding worden gekozen. Voor Ameland en de Friese Kust bestaat de keuze uit:

- asfalt;
- gras;
- steenzetting (zuilen);
- breuksteen;
- steenzetting (blokken).

De laatste twee typen steenbekleding zijn niet beschouwd in deze studie.

Bij het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden van bekledingen geeft de gebruiker een aantal waterstanden op, waarvoor de maatgevende golfcondities berekend moeten worden. Voor elke waterstand wordt aan de hand van golfhoogte, piekperiode en hoek van

golfinval een maatgevende combinatie van golfparameters berekend. Deze belasting, ook wel S-waarde genoemd, wordt berekend met de volgende vereenvoudigde formule:

$$S = H_s^a \cdot T_p^b \cdot \gamma(\beta), \text{ waarbij:}$$

- H_s = significante golfhoogte [m]
 T_p = piekperiode [s]
 $\gamma(\beta)$ = golfreductiefactor [-]
 β = hoek van golfinval t.o.v. dijknormaal [graden]
 a = parameterwaarde a voor golfhoogte [-]
 b = parameterwaarde b voor piekperiode [-]

Een uitgebreide beschrijving van de parameters behorende bij de verschillende bekledingstypen, die in Hydra-K versie 3.6.1 worden gebruikt, is te vinden in HKV & Alkyon (2010). Een overzicht van de gehanteerde waarden voor a en b is gegeven in Deltares (2011), waarvan de overzichtstabel onderstaand is gepresenteerd.

Bekledingstype	Afgeleide weegfunctie uit rekenregels	Parameters weegfunctie Hydra		
		a	b	$\gamma(\beta)$
Blokken	$S = H_s \cdot T_p \cdot \cos\beta$	1	1	$\cos\beta$
Zuilen	$S_{op} > 0,02: S = 0,1182 \cdot H_s^{5/6} \cdot T_p^{1/3} (\cos\beta)^{2/3}$	5/6	1/3	$(\cos\beta)^{2/3}$
	$S_{op} < 0,02: S = H_s / (3,7622 + 1 / (7 \sqrt{S_{op}})) (\cos\beta)^{2/3}$	Complex		$(\cos\beta)^{2/3}$
Afschuiving steenzettingen en asfaltbekledingen*	$S = H_s (\cos\beta)^{2/3}$	1	0	$(\cos\beta)^{2/3}$
Gras in golfklapzone**	$S = H_s^{0,75} \cdot T_p^{0,5}$	Vaststellen als nieuwe rekenregels bekend zijn		
Gras in golfploopzone**	$S = V_r \cdot \text{Toetspeil} = H_s / T_p \cdot (59,5 - 448,43 \cdot H_s / T_p^2) \cdot \tan\alpha_0$			
* Grafieken eenvoudige toetsing				
** Rekenregels worden momenteel herzien				

Tabel 2.1 Gehanteerde waarden voor weegfuncties in Hydra-K-Q, uit Deltares (2011)

Voor de bepaling van de Hydraulische Randvoorwaarden bij lagere waterstanden is per bekledingstype een illustratiepunt berekening uitgevoerd.

2.4 SWAN database

Hydra-K gebruikt voor het vertalen van offshore wind en waterstand naar het belastingniveau bij de dijk een database met resultaten van vooraf uitgevoerde SWAN berekeningen. Deze database bevat voor iedere uitvoerlocatie de berekende golfcondities bij de dijk voor vele combinaties van de offshore belastingvariabelen windsnelheid, windrichting en waterstand.

De meest recente versie van deze database voor de Waddenzee is de KustDB2006. De KustDB2006 database bevat de resultaten van SWAN berekeningen door Alkyon uit 1999, uitgevoerd met een verouderde SWAN-versie 30.62¹ en opgeslagen in de RAND2001 database. De gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ in de KustDB2006 database is met 10% verhoogd toen bekend werd dat in de originele SWAN berekeningen deze golfperiode

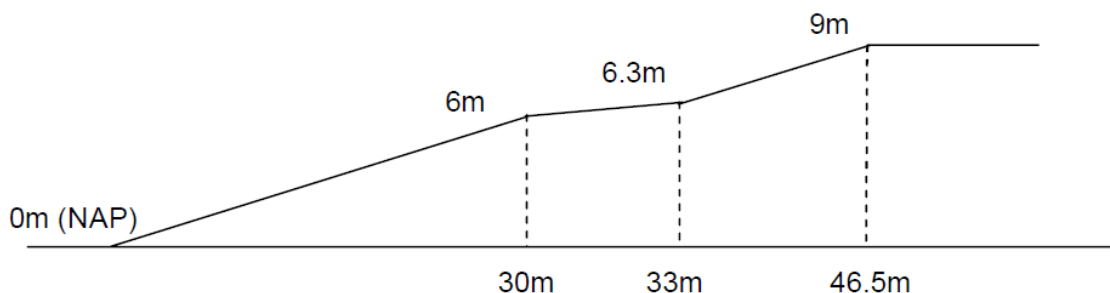
¹ De meest recente SWAN versie is 40.81 waarin nieuwe parameterisaties van golfgroei en dissipatie verwerkt zijn. De productieberekeningen voor HR2011 zijn uitgevoerd met versie 40.72, aangevuld met patches A, B, C, D en E.

systematisch onderschat werd (zie onder andere Deltares, 2009a). Onlangs is bekend geworden dat ook de significante golfhoogte H_{m0} door deze SWAN versie wordt onderschat. Voor dit rapport zijn daarom berekeningen uitgevoerd waarin de H_{m0} in de KustDB2006 database met 10% zijn verhoogd. De in dit rapport gehanteerde database is dus de RAND2001 database met 10% verhoging van zowel de golfhoogte als de golfperiode ($T_{m-1,0}$).

Voor WTI 2011 zal een nieuwe database met SWAN resultaten voor Hydra-K worden samengesteld. De SWAN berekeningen die hieraan ten grondslag liggen worden op een andere manier aangestuurd dan de SWAN berekeningen uit 1999, om een realistischer resultaat te bereiken. Elke SWAN berekening wordt voorafgegaan aan een WAQUA berekening, waarmee waterstand- en stromingsvelden worden berekend bij de opgegeven windcondities. Deze waterstands- en stromingsvelden zijn invoer voor de SWAN berekening. De interactie tussen hydrodynamica en golfvoortplanting en golfgroei wordt hierdoor verdisconteerd in de golfcondities bij de dijk. Deze nieuwe manier van aansturen van SWAN in HR2011 kan leiden tot afwijkende resultaten ten opzichte van resultaten die zouden zijn verkregen met de aansturing zoals gehanteerd in de HR2006 berekeningen voor de Hollandse kust en de Zeeuwse delta (zie RIKZ, 2006) en de berekeningen voor de Waddenzee (Zie Alkyon, 1999). Wijzigingen in SWAN, samengevat in Dongeren (2010), en bodem leiden verder nog tot lokale verschillen.

2.5 Dijkprofielen

Het standaard dijkprofiel dat in Hydra-K gebruikt wordt voor Ameland en de Friese Kust voor de bepaling van het overslagdebiet is weergegeven in figuur 2.2. Het profiel bestaat uit een onder- en boventalud met een tussenliggende berm. De voorzijde van de berm is gelegen op NAP +6 m en de helling van het onder- en boventalud is 1:5.



Figuur 2.2: Standaard-dijkprofiel zoals gedefinieerd in Hydra-K.

Dit standaardprofiel wijkt af van de werkelijke profielen van de zeedijken op Ameland en langs de Friese kust. Op Ameland hebben de dijken veelal een lagere berm, een 1:3 ondertalud en een 1:6 boventalud. Langs de Friese kust hebben de meeste dijken een ondertalud van ongeveer 1:4, een berm op ongeveer dezelfde hoogte als het standaardprofiel en een boventalud van 1:4 – 1:6.

In Deltares (2010a) en Deltares (2010b) is geconstateerd dat het dijkprofiel voor de locaties op Texel een niet-verwaarloosbare invloed heeft op de berekende golfcondities. Daarom is in deze studie voor elk dijkvak ook een berekening gemaakt met de huidige dwarsprofielen van de zeedijk. Voor Ameland is tevens een berekening gemaakt met het beoogde profiel zoals weergegeven in de tekening alternatief dubbele berm van Witteveen+Bos (2009).

In Hydra-K is het slechts mogelijk om drie verschillende taluds op te geven per dwarsprofiel. De huidige en beoogde dwarsprofielen zijn daarom geschematiseerd tot een dwarsprofiel met drie verschillende dijktaaluds. Deze dijkprofielen zijn in dit rapport opgenomen in Bijlage A.

3 Hydraulische toets-randvoorwaarden Ameland

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten van de verschillende berekeningen die zijn uitgevoerd voor Ameland:

- de resultaten gebruik makend van een standaard dijkprofiel (par. 3.2);
- de resultaten gebruik makend van het werkelijke dijkprofiel (par. 3.3);
- de resultaten gebruik makend van een beoogd dijkprofiel: Variant dubbele berm, dwarsprofielen Witteveen+Bos (2009) (par. 3.4).

De resultaten zijn verkregen door in ieder uitvoerpunt, met een onderlinge afstand van ongeveer 250 m, een Hydra-K berekening uit te voeren voor drie bovengenoemde profielen. Het gebruikte faalmechanisme voor de bepaling van maatgevende golfcondities is golfoverslag en het faal criterium is een overslagdebiet van 1 l/m/s. Zoals genoemd in par. 2.2 is dit een gangbaar faalmechanisme voor het bepalen van randvoorwaarden voor de toetsing op hoogte.

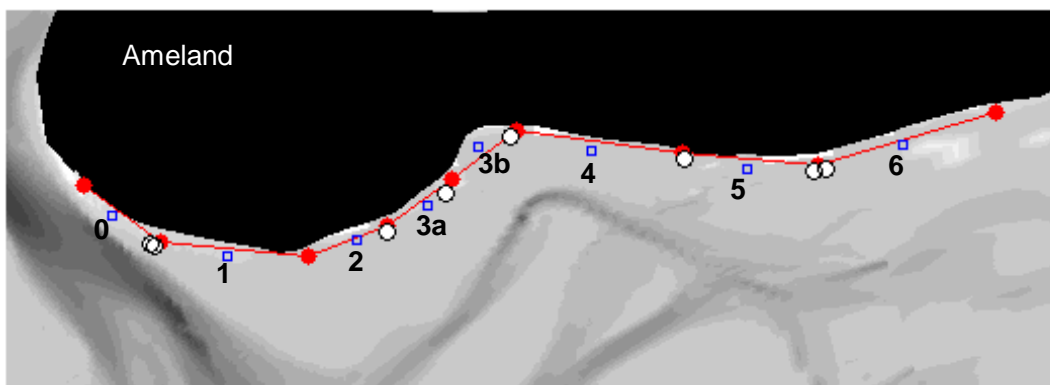
In de Hydra-K berekeningen is gebruik gemaakt van de RAND2001 database. Daarbij is een correctie toegepast van +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$ voor een normfrequentie van 1/2000 per jaar.

Per dijkvak worden meerdere uitvoerpunten beschouwd. In verband met het beoogde doel van de randvoorwaarden (ontwerp) is voor elk dijkvak de Hydra-K uitvoerlocatie langs het betreffende dijktraject gekozen waar $H_{m0} * T_{m-1,0}$ maximaal is. In dit geval betreffen H_{m0} en $T_{m-1,0}$ de significante golfhoogte en gemiddelde periode in het illustratiepunt dat Hydra-K heeft berekend. De uitvoerpunten en de bijbehorende dijkoriëntaties nabij het midden van elk dijkvak en op de locaties waar $H_{m0} * T_{m-1,0}$ maximaal is, zijn weergegeven in tabel 3.1 en in figuur 3.1. Veel locaties, waar $H_{m0} * T_{m-1,0}$ maximaal is, liggen aan de rand van een dijkvak.

De berekende toetsrandvoorwaarden zijn vergeleken met de HR2006 en de deterministische randvoorwaarden uit WL (2007).

Dijkvak	midden dijkvak			locatie maximum $H_{m0} * T_{m-1,0}$		
	x[m RD]	y [m RD]	Oriëntatie [°N]	x[m RD]	y [m RD]	Oriëntatie [°N]
0	171306	605013	216	171937	604537	206
1	173171	604366	187	172008	604508	196
2	175304	604619	167	175791	604734	167
3a	176428	605183	148	176747	605382	147
3b	177245	606128	133	177795	606301	178
4	179087	606069	195	180608	605925	216
5	181628	605784	186	182702	605728	183
6	184158	606171	163	182915	605774	162

Tabel 3.1: De Hydra-K uitvoerpunten in het midden van de dijkvakken met coördinaten en oriëntaties



Figuur 3.1: Locatie midden van elke dijkvak (zie blauwe rechthoeken) en maximum van elk dijkvak (witte cirkels).

3.2 Standaard dijkprofiel

Tabel 3.2 geeft de illustratiepunten (IP2, zie paragraaf 2.2) weer die het resultaat zijn van Hydra-K berekeningen met de gecorrigeerde RAND2001 database (verhoging H_{m0} met 10% en verhoging $T_{m-1,0}$ met 10%) voor het standaard dijkprofiel. Per dijkvak worden de windrichting (θ_w), de windsnelheid (U_w), het toetspeil, de significante golfhoogte (H_{m0}), de piekperiode (T_{pm}), de gemiddelde periode ($T_{m-1,0}$) en de golfrichting (Dir) gepresenteerd. De berekende windsnelheden zijn relatief laag in vergelijking met andere locaties/toepassingen, omdat de kansruimte wordt gedomineerd door de waterstand en in mindere mate door de golven.

Dijkvak	θ_w [°N]	U_w [m/s]	Toetspeil [m+NAP]	H_{m0} [m]	T_{pm}^2 [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	Dir [°N]
0	273	23,9	4,40	1,56	5,31	4,58	239
1	273	24,0	4,45	1,57	5,34	4,62	240
2	270	21,3	4,50	1,23	5,22	4,34	226
3a	270	21,7	4,50	1,10	5,36	4,46	210
3b	273	22,3	4,55	1,09	5,45	4,46	204
4	270	22,6	4,55	1,33	4,85	4,26	230
5	270	23,8	4,50	1,45	5,02	4,37	234
6	270	23,1	4,50	1,37	5,03	4,35	231

Tabel 3.2: Toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met het standaardprofiel in Hydra-K en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$

3.3 Werkelijke dijkprofiel

Tabel 3.3 geeft de illustratiepunten (IP2, zie paragraaf 2.2) weer die het resultaat zijn van Hydra-K berekeningen met de (geschematiseerde) werkelijke profielen (zie bijlage A), gebruik makend van de RAND2001 database met 10% verhoging van H_{m0} en $T_{m-1,0}$. Voor dijkvakken 0 en 1 neemt de maatgevende golfhoogte toe (orde centimeters) ten opzichte van de resultaten met een standaardprofiel. Voor de overige dijkvakken neemt de golfhoogte af (orde centimeter) ten opzichte van de resultaten met een standaardprofiel. De verschillen in de golfperiode $T_{m-1,0}$ zijn kleiner dan 0.05 seconden. Een verklaring voor de afname van de

- De waarden voor T_{pm} zijn in de KustDB2006 database niet verhoogd met 10%, terwijl dit vanuit fysica wel verwacht mag worden. Derhalve zijn de T_{pm} waarden berekend met Hydra-K met 10% verhoogd om de juiste indicatie van de piek golfperiode te verkrijgen.

golfhoogte is dat voor deze locaties de helling op het boventalud van het werkelijke profiel flauwer is (1:6 of 1:7) dan de helling van het standaardprofiel (1:5), wat leidt tot minder golfoploop. De verschillen tussen werkelijk en standaard profiel zijn overigens zeer beperkt als gevolg van de beperkte verschillen in taludhelling. Voor Texel waren deze verschillen groter (zie Deltares, 2010b) waardoor een profielafhankelijkheid wel duidelijk aangetoond kon worden.

Dijkvak	θ_w [°N]	U_w [m/s]	Toetspeil [m+NAP]	H_{m0} [m]	T_{pm}^2 [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	Dir [°N]
0	273	24,1	4,40	1,57	5,32	4,59	239
1	273	24,3	4,45	1,58	5,35	4,63	240
2	273	21,8	4,50	1,21	5,23	4,32	227
3a	272	21,1	4,50	1,06	5,33	4,40	211
3b	275	21,4	4,55	1,02	5,42	4,42	205
4	270	23,4	4,55	1,36	4,86	4,28	230
5	270	24,1	4,50	1,46	5,04	4,38	234
6	273	24,3	4,50	1,37	5,04	4,35	232

Tabel 3.3: Toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met het werkelijke profiel in Hydra-K en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$

3.4 Beoogde dijkprofiel

In tabel 3.4 zijn de resultaten weergegeven van de Hydra-K berekeningen met de beoogde dijkprofielen en een gecorrigeerde RAND2001 database. Voor alle dijkvakken nemen de maatgevende golfhoogte en golfperiode iets toe (wederom orde centimeters en honderdsten van seconden) ten opzichte van de berekeningen met het standaardprofiel en het werkelijke profiel.

Dijkvak	θ_w [°N]	U_w [m/s]	Toetspeil [m+NAP]	H_{m0} [m]	T_{pm}^2 [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	Dir [°N]	H_{m0}^* $T_{m-1,0}$ [m*s]
0	270	23,5	4,40	1,58	5,32	4,61	237	7,29
1	270	23,7	4,45	1,60	5,35	4,65	238	7,43
2	270	22,5	4,50	1,27	5,27	4,39	226	5,59
3a	270	23,4	4,50	1,17	5,43	4,53	210	5,28
3b	270	22,7	4,55	1,15	5,46	4,49	204	5,15
4	270	23,5	4,55	1,36	4,86	4,29	230	5,83
5	270	24,4	4,50	1,46	5,04	4,39	234	6,43
6	270	24,0	4,50	1,40	5,05	4,38	231	6,13

Tabel 3.4: Toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met het beoogde profiel in Hydra-K en RAND2001 met 10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$

3.5 Vergelijking Hydra-K berekeningen met HR2006 en deterministisch bepaalde HR

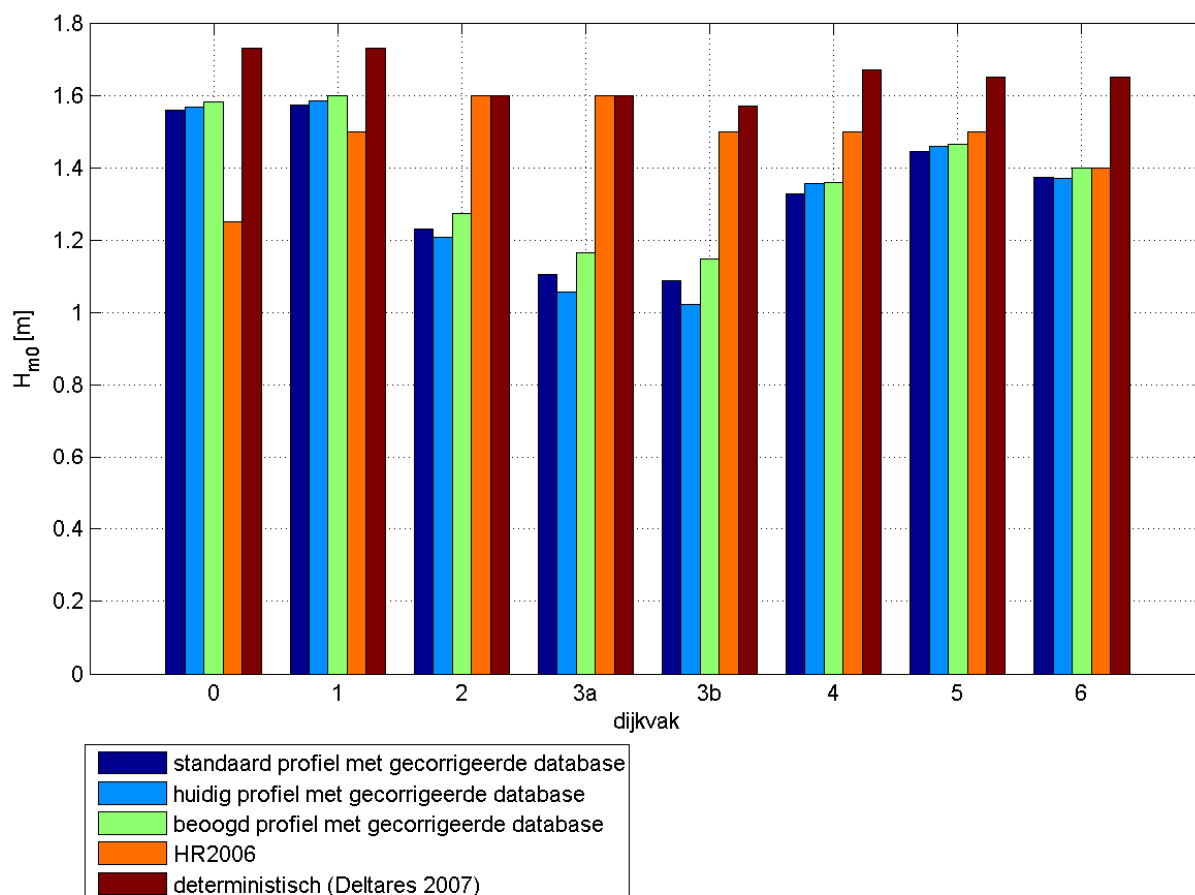
Uit de Hydra-K berekeningen met het standaardprofiel, het huidige profiel en het beoogd profiel blijkt dat de afhankelijkheid van de golfhoogte voor het dijkprofiel op de dijkvakken 1-6 klein is (verschillen in de orde van enkele centimeters), zie figuur 3.2.

Verder zijn de met Hydra-K berekende golfhoogte voor verschillende dijkprofielen en randvoorwaarden vergeleken met de maatgevende golfhoogtes bepaald voor de HR2006.

Voor drie dijkvakken (0, 1 en 6) is de golfhoogte van de HR2006 lager dan of gelijk aan de berekende golfhoogte met Hydra-K (circa 0-0,40 meter). In deze dijkvakken is echter een grote variatie in de berekende golfhoogte voor verschillende uitvoerlocaties. Daar waar de HR2006 zijn afgegeven op een bepaalde locatie, worden de toets-randvoorwaarden in deze studie bepaald als het maximum van de Hydra-K resultaten over het dijkvak. Voor de overige dijkvakken is de golfhoogte van de HR2006 conservatiever (circa 0-0,50 meter) dan de Hydra-K berekeningen.

Tot slot zijn de probabilistisch berekende golfhoogtes met Hydra-K vergeleken met de deterministisch bepaalde golfhoogtes gepresenteerd in WL (2007). De deterministisch bepaalde golfhoogtes uit WL (2007) zijn in alle gevallen conservatiever (0,10 tot 0,60 meter) dan de met Hydra-K berekende golfhoogtes.

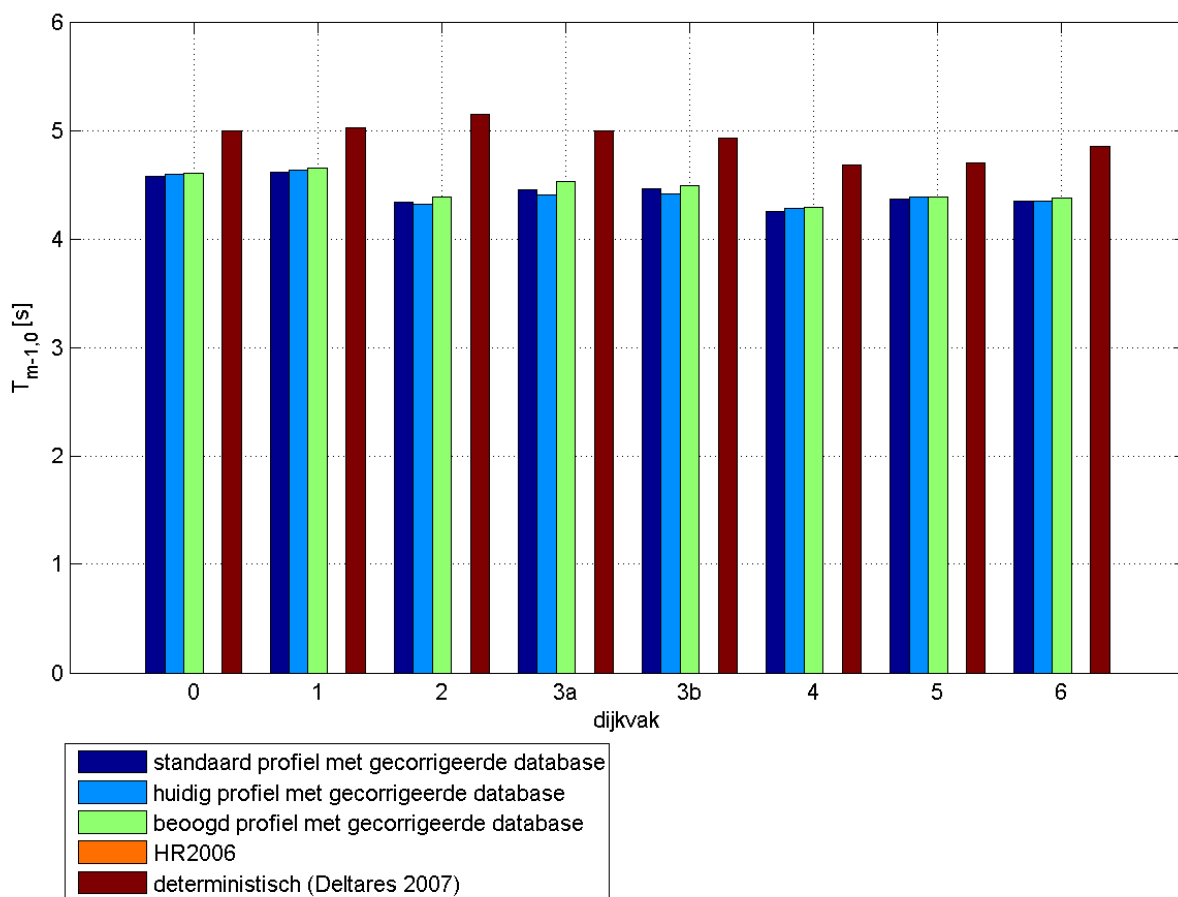
Omdat in de deterministische aanpak geen rekening gehouden wordt met de correlatie tussen waterstand en wind, kan het voorkomen dat de deterministisch bepaalde golfcondities worden veroorzaakt door een zuidelijke wind, die loodrechte golfaanval op de zuidkant van Ameland veroorzaakt, terwijl de hoge waterstand is veroorzaakt door een noordwestelijke wind. Hydra-K houdt wel rekening met deze correlatie. Omdat de waterstand dominant is in de kansruimte en deze de hoogste waarden halen bij westelijke tot noordwestelijke windrichting, zullen de golven ook uit die richting komen. Deze zijn over het algemeen lager dan de loodrecht invallende golven uit zuidelijke richting. Dit maakt de golfrandvoorwaarden uit Hydra-K lager en realistischer.



Figuur 3.2: Vergelijking van de golfhoogte H_{m0} uit de verschillende berekeningen met HR2006 en WL (2007)

In de HR2006 zijn geen golfperiodes gegeven voor de dijkvakken 0 tot en met 6 van Ameland. In figuur 3.3 worden de deterministisch bepaalde golfperiodes (WL, 2007) vergeleken met de maatgevende golfperiodes, berekend met Hydra-K. Voor alle dijkvakken geeft de deterministische methode een hogere golfperiode (circa 0,2 tot 0,9 seconden) dan de probabilistische methode. Dit is in lijn met de verwachtingen, omdat deterministische methoden in de regel tot hogere randvoorwaarden leiden dan probabilistische methoden.

Verder bevestigt figuur 3.3 de conclusie in de voorgaande paragrafen dat de profielafhankelijkheid van de golfperiode klein is voor de dijkvakken van Ameland.



Figuur 3.3: Golfperiode $T_{m-1,0}$ uit de verschillende berekeningen en WL (2007), geen HR2006 resultaten aanwezig

4 Hydraulische toets-randvoorwaarden Friese kust

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten van de verschillende berekeningen die zijn uitgevoerd voor de Friese kust:

- de resultaten gebruik makend van een standaard dijkprofiel (par. 4.2);
- de resultaten gebruik makend van het werkelijke dijkprofiel (par. 4.3);

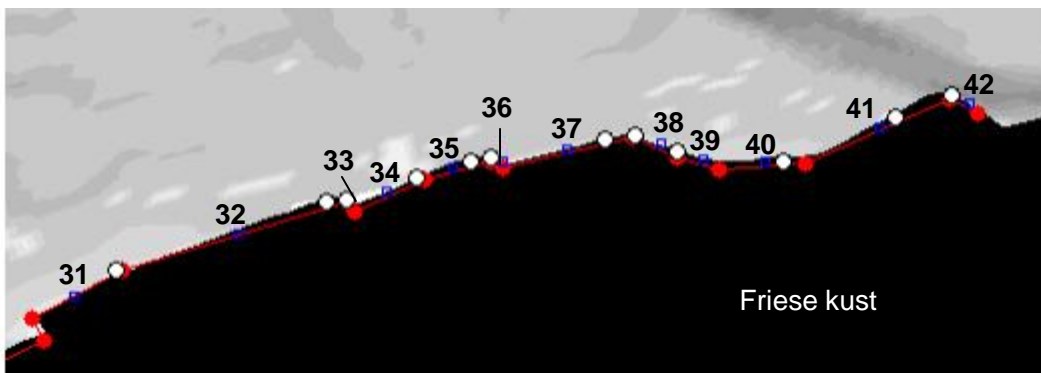
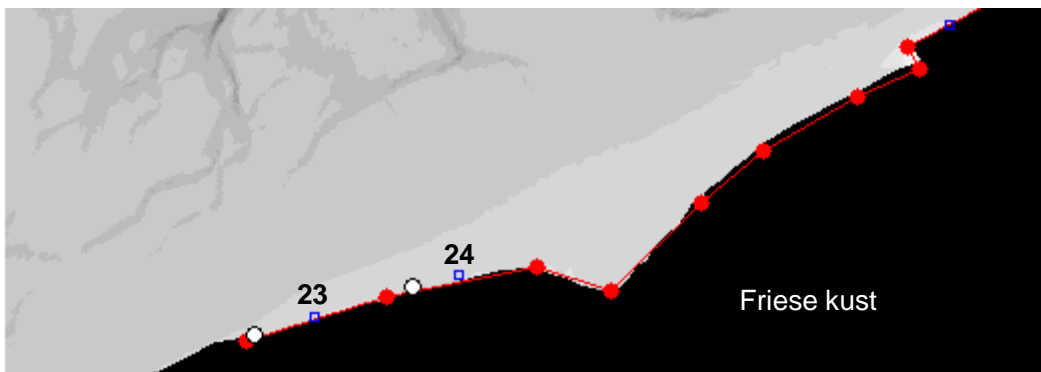
Evenals voor Ameland zijn de resultaten verkregen door Hydra-K berekeningen uit te voeren voor bovengenoemde profielen met het gebruikte faalmechanisme golfoverslag, waarbij het faal criterium is een overslagdebiet van 1 l/m/s. In de Hydra-K berekeningen is gebruik gemaakt van de RAND2001 database. Daarbij is een correctie toegepast van +10% op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$ voor een normfrequentie van 1/4000 per jaar. Evenals voor Ameland wordt de met Hydra-K verkregen golfperiode T_{pm} achteraf met +10% gecorrigeerd.

Per dijkvak worden meerdere uitvoerpunten beschouwd. In verband met de beoogde toepassing van de randvoorwaarden (ontwerp) is ook voor de Friese Kust voor elk dijkvak de Hydra-K uitvoerlocatie langs het betreffende dijktraject gekozen waar $H_{m0} * T_{m-1,0}$ maximaal is, met wederom H_{m0} en $T_{m-1,0}$ de significante golfhoogte en gemiddelde periode in het door Hydra-K berekende illustratiepunt. De uitvoerpunten en de bijbehorende dijkoriëntaties nabij het midden van elk dijkvak en op de locaties waar $H_{m0} * T_{m-1,0}$ maximaal is, zijn weergegeven in tabel 4.1 en in figuur 4.1.

Verder is in dit hoofdstuk een vergelijking gemaakt tussen de berekende randvoorwaarden uit de huidige studie en de HR2006.

Dijkvak	midden dijkvak			locatie maximum $H_{m0}^*T_{m-1,0}$		
	x[m RD]	y [m RD]	Oriëntatie [°N]	x[m RD]	y [m RD]	Oriëntatie [°N]
23	172545	592054	340	171149	591638	343
24	175919	593001	350	174820	592763	347
31	187310	598841	334	188322	599472	333
32	191136	600315	344	193201	601058	356
33 ³	193693	601116	11	193693	601116	11
34	194603	601259	335	195331	601591	340
35	196147	601856	339	196549	601988	329
36	197295	601974	30	197027	602096	5
37	198797	602281	347	199684	602480	348
38	201008	602377	8	200412	602606	14
39	201963	602030	15	201393	602193	48
40	203413	601969	357	203851	601997	356
41	206067	602789	333	206460	602989	333
42	208190	603352	32	207752	603509	4

Tabel 4.1: De Hydra-K uitvoerpunten in het midden van de dijkvakken met coördinaten en oriëntaties



Figuur 4.1: Locatie midden van elke dijkvak (zie blauwe rechthoeken) en maximum van elk dijkvak (witte cirkels).

3. Dijkvak 33 bevat slechts 1 uitvoerlocatie in Hydra-K.

4.2 Standaard dijkprofiel

Tabel 4.2 geeft de toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met Hydra-K en de RAND2001 database met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$ voor het standaard dijkprofiel. Per dijkvak worden de windrichting (θ_w), de windsnelheid (U_w), het toetspeil, de significante golfhoogte (H_{m0}), de piekperiode (T_{pm}), de gemiddelde periode ($T_{m-1,0}$) en de golfrichting (Dir) gegeven.

De meeste berekende windsnelheden zijn relatief laag in vergelijking met andere locaties omdat de kansruimte wordt gedomineerd door de waterstand en de bijdrage van de golven daaraan beperkt is. Opvallend is de hoge windsnelheid voor dijkvak 31. Dit komt doordat er voor dit dijkvak circa 2 kilometer ondiep voorland ligt waardoor een dieptebeperking van de golven geldt. Dit heeft tot gevolg dat de golfhoogte bij een windsnelheid van 30 m/s niet veel verschilt (slechts enkele centimeters) van een windsnelheid van 50 m/s. De berekende golfcondities kunnen dan ook gewoon gebruikt worden.

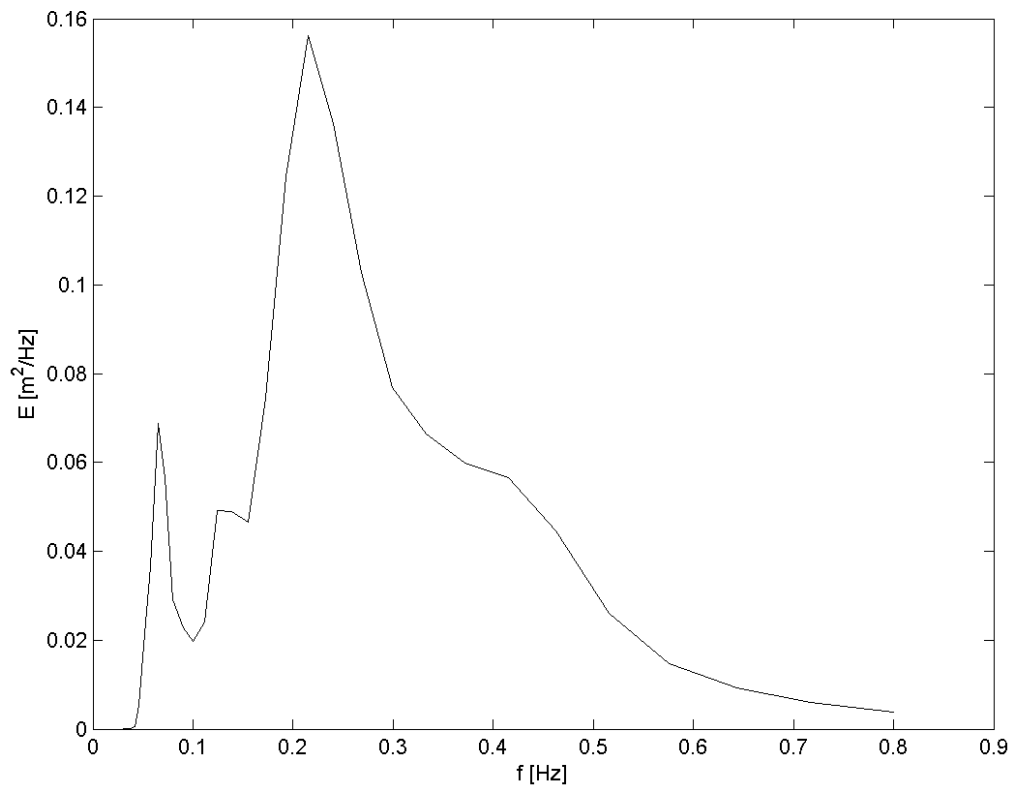
Voor een aantal dijkvakken zoals dijkvak 32 en 41 is de verhouding tussen T_{pm} en $T_{m-1,0}$ opvallend groot. T_{pm} is in deze gevallen bijna een factor 1,5 groter dan $T_{m-1,0}$ (ter vergelijking: vaak wordt een verhouding van 1,1 aangenomen). Dit duidt op de aanwezigheid van een dubbel gepiekt golfspectrum.

Ter illustratie tonen we in Figuur 4.1 het energiespectrum op de locatie (191136 m + RD, 600314 m + RD), zoals dat volgt uit de SWAN berekeningen t.b.v. de originele RAND2001 database (dus zonder correctie), bij een windsnelheid van 26 m/s, windrichting 330 °N en waterstand 5 m + NAP. Deze combinatie ligt het dichtst bij het illustratiepunt dat is berekend in Tabel 4.2 voor dijkvak 32. Hier is duidelijk een laag-frequente piek te zien, die wordt veroorzaakt door de golven die vanaf de Noordzee door het Friesche Zeegat in de Waddenzee doordringen. De grootste hoeveelheid energie is echter lokaal opgewekt in de Waddenzee zelf. Het energiespectrum ziet er dus alleszins realistisch uit.

De gemiddelde periode is een periodemaat die wordt gewogen over het gehele spectrum. De piekperiode is echter een discrete maat. Voor enkeltoppige spectra is deze eenduidig gedefinieerd als de periode (1 gedeeld door frequentie) waarbij de energie zijn maximum bereikt. In getoond voorbeeld geldt dat $T_p = 4.3$ s. Echter voor meertoppige spectra heeft men lang geleden nagedacht over meer robuuste piekperiodematen dan de oorspronkelijke piekperiode. Dit heeft geleid tot zogenaamde blok piek periodes en equivalente piekperiodes. Voor een definitie van deze periodes verwijzen we naar Bijlage C. In de Hydra-K berekeningen wordt gebruik gemaakt van de karakteristieke piekperiode T_{pm} , gedefinieerd als het maximum van de blok piekperiode en equivalente piekperiode. Zoals in Bijlage C is te zien is de equivalente periode gedefinieerd als:

$$T_{peq} = \sqrt[4]{T_{p,1}^4 \frac{m_0^{(1)}}{m_0} + T_{p,2}^4 \frac{m_0^{(2)}}{m_0}} \quad (4.1)$$

waarbij met de subscripts 1 en 2 verwezen wordt naar de beide pieken. De weging is gebaseerd op de hoeveelheid energie in de pieken. Voor het energiespectrum in Figuur 4.1 leidt de vierde macht van de piekperiode van de laag-frequente piek er toe dat deze veruit dominant is, ondanks dat er minder energie bij de lage frequenties zit. Dit zorgt er voor dat de T_{pm} grotendeels door de laag-frequente piek wordt bepaald en uitkomt op $T_{pm} = 7.6$ s. Dit oogt niet realistisch.



Figuur 4.1 Met SWAN berekend energie spectrum (Alkyon, 1999) op maatgevende locatie in dijkvak 32 voor een windsnelheid van 26 m/s, windrichting 330 °N en waterstand 5 m + NAP.

Bij dubbel gepiekte spectra zegt de $T_{m-1,0}$ meer over de energieverdeling dan de T_{pm} . Voor de berekening van overslag wordt daarom aangeraden gebruik te maken van de $T_{m-1,0}$.

Voor dijkvak 33 zijn geen randvoorwaarden berekend, omdat de RAND2001 database op de enige uitvoerlocatie voor dit dijkvak te weinig gegevens bevat. De karakteristieken van dit dijkvak zijn bij benadering gelijk aan de karakteristieken van dijkvak 34. Daarom wordt geadviseerd om de Hydraulische randvoorwaarden van dijkvak 34 ook voor dijkvak 33 te gebruiken (conform Deltares, 2009b).

Dijkvak	θ_w [°N]	U_w [m/s]	Toetspeil [m+NAP]	H_{m0} [m]	T_{pm}^4 [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	Dir [°N]
23	309	26,2	4,80	1,44	6,46	4,72	319
24	307	22,5	4,80	1,26	6,18	4,52	319
31	301	51,6	4,85	1,58	5,10	4,08	312
32	320	24,2	4,85	1,53	8,03	4,84	338
33							
34	326	18,1	4,85	1,47	8,81	5,77	346
35	319	17,9	4,85	1,50	8,88	5,79	337
36	321	16,8	4,90	1,49	8,60	5,70	338
37	320	17,3	4,90	1,53	8,77	5,81	337
38	320	16,8	4,95	1,54	8,72	5,85	336
39	324	11,7	4,95	1,20	6,25	6,03	354
40	312	11,5	4,95	1,10	6,40	6,05	343
41	310	24,7	5,00	1,78	9,32	5,93	327
42	310	31,6	5,00	2,18	6,51	4,80	317

Tabel 4.2: Toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met het standaardprofiel in Hydra-K en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$

4.3 Werkelijke dijkprofiel

Tabel 4.3 geeft de resultaten voor de (geschematiseerde) werkelijke profielen (zie bijlage A), gebruik makend van de RAND2001 database met 10% verhoging van H_{m0} en $T_{m-1,0}$. De verschillen tussen de maatgevende condities, afgeleid voor het werkelijke en standaard profiel, zijn beperkt. Voor dijkvakken 23, 24, 31 en 32 is de maatgevende golfhoogte lager (orde centimeters) ten opzichte van de resultaten met een standaardprofiel. Voor de overige dijkvakken is de golfhoogte een klein beetje hoger (orde centimeters) ten opzichte van de resultaten met een standaardprofiel. De verschillen in golfperiode zijn in de orde van tienden van seconden, waarbij geldt dat deze voor de werkelijke profielen hoger zijn dan voor de standaard profielen. Voor dijkvak 33 zijn weer geen randvoorwaarden berekend. Voor dit dijkvak geldt de opmerking in paragraaf 4.2.

Ook voor de werkelijke profielen geldt de opmerking in paragraaf 4.2 over de verhouding tussen T_{pm} en $T_{m-1,0}$.

-
4. De waarden voor T_{pm} zijn in de KustDB2006 database niet verhoogd met 10%, terwijl dit vanuit fysica wel verwacht mag worden. Derhalve zijn de T_{pm} waarden berekend met Hydra-K met 10% verhoogd om de juiste indicatie van de piek golfperiode te verkrijgen.

Dijkvak	θ_w [°N]	U_w [m/s]	Toetspeil [m+NAP]	H_{m0} [m]	T_{pm}^4 [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	Dir [°N]
23	312	23,8	4,80	1,42	6,68	4,73	322
24	311	21,8	4,80	1,25	6,23	4,51	322
31	302	34,8	4,85	1,47	5,34	4,27	311
32	327	20,7	4,85	1,44	8,31	5,12	345
33							
34	327	18,0	4,85	1,48	8,77	5,77	346
35	319	17,9	4,85	1,50	8,88	5,79	337
36	324	16,2	4,90	1,50	8,41	5,68	341
37	323	16,9	4,90	1,54	8,66	5,81	338
38	321	16,8	4,95	1,55	8,72	5,86	336
39	327	11,7	4,95	1,22	5,76	6,05	355
40	318	11,7	4,95	1,12	6,58	6,23	345
41	311	24,7	5,00	1,78	9,35	5,94	327
42	310	32,1	5,00	2,20	6,52	4,81	317

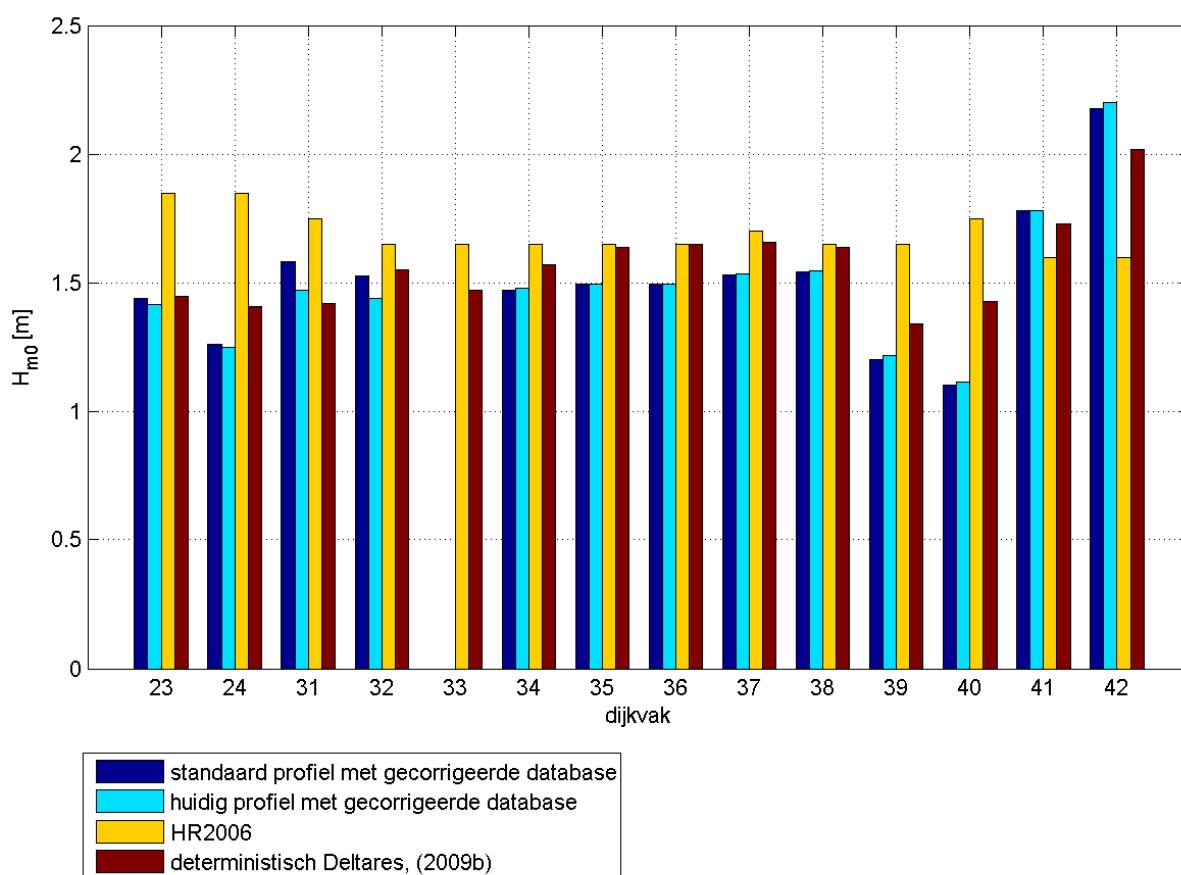
Tabel 4.3: Toetsrandvoorwaarden (IP2) berekend met het werkelijke profiel in Hydra-K en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} en golfperiode $T_{m-1,0}$

4.4 Vergelijking Hydra-K berekeningen met HR2006

Uit de Hydra-K berekeningen met het standaardprofiel en het huidig profiel blijkt dat de afhankelijkheid van de golfhoogte voor het dijkprofiel op de dijkvakken klein is (orde centimeters), zie figuur 4.2.

Verder zijn de met Hydra-K berekende golfhoogten voor verschillende dijkprofielen en randvoorwaarden vergeleken met de maatgevende golfhoogtes bepaald voor de HR2006. Voor de dijkvakken 41 en 42 is de golfhoogte van de HR2006 lager (circa 0,10 - 0,60 meter) dan de berekende golfhoogte met Hydra-K. In deze dijkvakken is echter een grote variatie in de berekende golfhoogte voor verschillende uitvoerlocaties. Voor de overige dijkvakken is de golfhoogte van de HR2006 0,10 tot 0,60 meter hoger dan de Hydra-K berekeningen.

Tot slot zijn de probabilistisch berekende golfhoogtes met Hydra-K vergeleken met de deterministisch bepaalde golfhoogtes gepresenteerd in Deltares (2009b). De deterministisch bepaalde golfhoogtes uit Deltares (2009b) zijn in veel gevallen hoger dan de met Hydra-K berekende golfhoogtes, maar lager dan de HR2006. Voor de dijkvakken 31, 41 en 42 zijn de deterministisch bepaalde golfhoogtes lager dan de met Hydra-K berekende golfhoogtes.

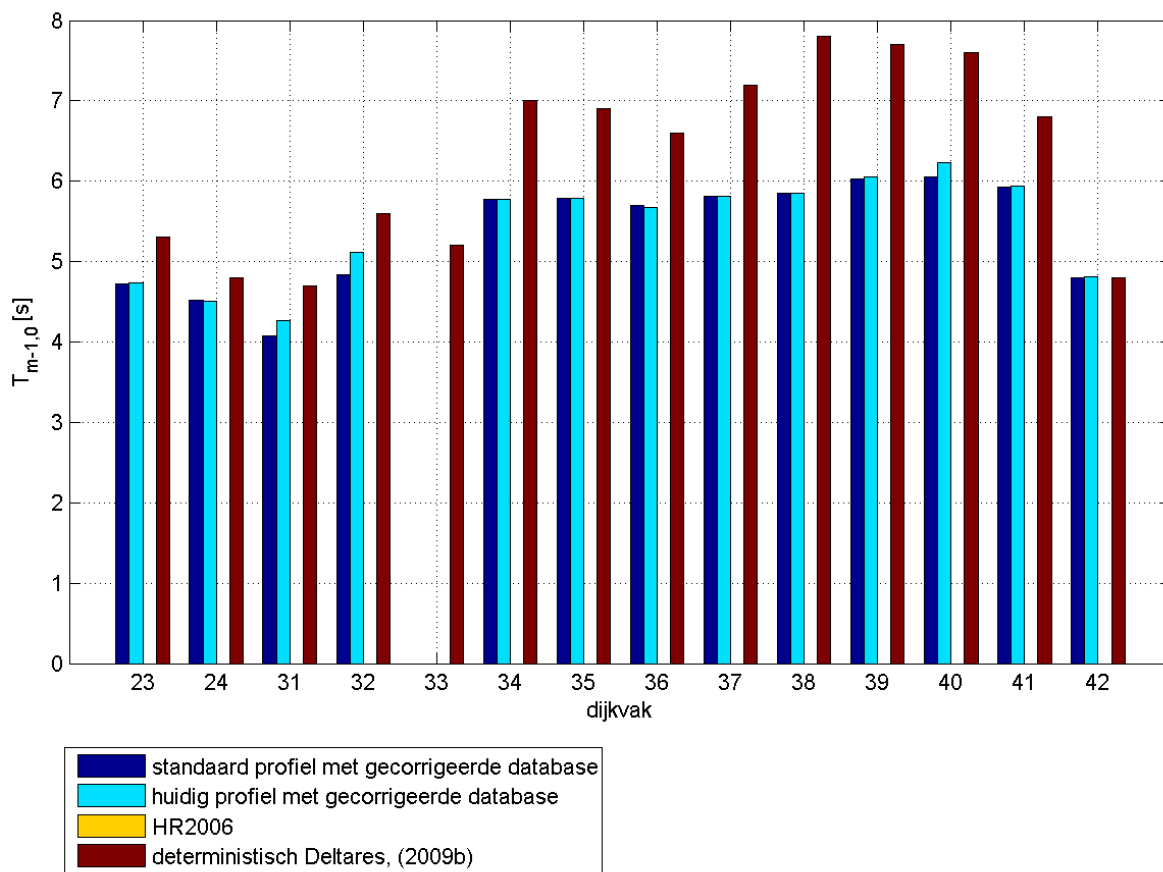


Figuur 4.2: Vergelijking van de golfhoogte H_{m0} uit de verschillende berekeningen met HR2006 en Deltares (2009b)

In de HR2006 zijn geen golfperiodes gegeven voor de dijkvakken langs de Friese kust. Uit figuur 4.3 blijkt dat ook de verschillen in de golfrandvoorwaarden klein is bij de twee beschouwde profielen.

In figuur 4.3 zijn wel de deterministisch bepaalde golfperiodes weergegeven. Voor alle dijkvakken geeft de deterministische methode een hogere golfperiode dan de probabilistische methode (Hydra-K). Alleen voor dijkvak 42 is de deterministische golfperiode ongeveer gelijk aan de met Hydra-K berekende golfperiode.

Het verschil tussen de deterministisch bepaalde en probabilistisch bepaalde randvoorwaarden voor de Friese Kust is kleiner dan voor dijkvakken op Ameland. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat voor de Friese Kust de hoogste waterstanden sterk gecorreleerd zijn met de grootste golven. In een dergelijke situatie leidt een deterministische aanpak tot minder conservatieve randvoorwaarden ten opzichte van de probabilistische aanpak.



Figuur 4.3: Golfperiode $T_{m-1,0}$ uit de verschillende berekeningen en Deltares (2009b), geen HR2006 resultaten aanwezig

5 Hydraulische ontwerp-randvoorwaarden

De toetsrandvoorwaarden zijn een beste schatting van de maatgevende condities, zonder rekening te houden met kennisonzekerheid en de effecten van klimaatsverandering. Voor het ontwerpen van waterkeringen dient een toeslag te worden gebruikt om deze onzekerheden mee te nemen. Voor het bepalen van de juiste toeslagen is het van belang duidelijk onderscheid te maken tussen bias-correcties, robuustheidstoelagen en klimaattoelagen:

- Bias-correcties worden uitgevoerd voor bekende modelfouten: geconstateerde systematische afwijkingen tussen model en metingen. De grootte van de biascorrectie wordt afgeleid van geconstateerde verschillen tussen modelresultaten en metingen. Een voorbeeld hiervan is de 10% correctie op de golfhoogte en periode in de RAND2001 database zoals toegepast in deze studie. Deze correctie is dus reeds verdisconteerd in de resultaten zoals gepresenteerd in de tabellen in hoofdstuk 3 en 4.
- Robuustheidstoelagen worden toegepast voor onbekende fouten, zoals onzekerheid als gevolg van onvolkomenheden in de modellering (procesbeschrijving of invoer zoals bodem en wind) die leiden tot niet-systematische fouten. Een voorbeeld is het effect van stroming op de nearshore golfcondities. Dit effect wordt op dit moment niet in de modellen meegenomen, maar in de HR2011 wel.
- Klimaattoelagen om de effecten van klimaatverandering in rekening te brengen.

Algemene richtlijnen voor robuustheidstoelagen in de Waddenzee zijn vastgelegd in Rijkswaterstaat (2010) en worden ook gehanteerd voor andere ontwerpen in dit gebied. De hierin voorgeschreven robuustheidstoelag is **10%** op zowel de golfhoogte als de golfperiode en een toeslag van **10 centimeter** op de waterstand. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met zeespiegelstijging. Dit betreft een klimaattoelag en geen robuustheidstoelag. Tevens dient te worden opgemerkt dat geen rekening is gehouden met bodemdaling.

Er zijn verschillende absolute zeespiegelrijzing scenario's, zie tabel 5.1 (de definities worden uitgelegd in Rijkswaterstaat (2010) en KNMI (2001)). Voor Ameland en de Friese kust wordt uitgegaan van een zichtduur van 50 jaar (2015-2065) en het klimaatscenario WB21 midden. Hiermee komt het klimaatscenario op een waterstandstoename van **0,35 meter**. De totale toeslag op de toetswaterstand komt daarmee op 0,45 meter, opgebouwd uit 0,35 meter (klimaatscenario) en 0,1 meter (robuustheidstoelag).

Klimaatscenario	2050	2100
Scenario W+ (KNMI, maximaal)	+0,35 m	+0,85 m
Scenario DC (Delta Commissie)	+0,35 m	+1,20 m
WB21 midden	+0,25 m	+0,60 m

Tabel 5.1: Klimaatscenarios uit memo Rijkswaterstaat (2010) en klimaatscenario WB21 midden (KNMI, 2001)

Daarnaast wordt de golfhoogte beïnvloed door de stijgende zeespiegel. Rijkswaterstaat (2010) raadt aan om uit te gaan van $\Delta H_{m0} = 0,45\Delta d$, waarbij Δd de relatieve zeespiegelstijging is. Deze relatie geldt voor diepte gelimiteerde golfgroei, zoals plaatsvindt voor de Friese kust. Voor Ameland vindt geen dieptelimitering van de golfhoogte plaats en daarom geldt deze relatie niet. In dat geval wordt dus geen stijging van de golfhoogte meegenomen.

In het geval van een zeespiegelstijging van 0,35 meter wordt een golfhoogtestijging van **0,16 meter** berekend voor de Friese kust. Conform Rijkswaterstaat (2010) wordt geen extra toename van de golfperiode toegepast.

Bij de toetsrandvoorwaarden voor Ameland (zie tabel 3.2), waarbij gerekend is met het beoogde dijkprofiel en een gecorrigeerde database, zijn de robuustheidstoelagen en klimaattoelagen opgeteld, zie tabel 5.2. Op deze manier worden ontwerprandvoorwaarden verkregen, die gebruikt kunnen worden bij het ontwerp van de dijken op Ameland.

Dijkvak	Waterstand [m]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [s]
0	4,85	1,74	5,85	5,07
1	4,90	1,76	5,88	5,12
2	4,95	1,40	5,80	4,83
3a	4,95	1,28	5,97	4,98
3b	5,00	1,26	6,00	4,94
4	5,00	1,50	5,35	4,72
5	4,95	1,61	5,54	4,83
6	4,95	1,54	5,56	4,82

Tabel 5.2: Ontwerprandvoorwaarden (IP2) voor Ameland berekend met het beoogde profiel en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} , +10% correctie op de golfperiodes, een robuustheidtoeslag van 0,10 meter op de waterstand en 10% op de golfhoogte en golfperiode en een klimaattoeslag van 0,35 meter op de waterstand.

Voor de Friese kust zijn de robuustheidstoelagen en klimaattoelagen opgeteld bij de toetsrandvoorwaarden (tabel 4.2), waarbij gerekend is met het huidige dijkprofiel en een gecorrigeerde database, zie tabel 5.3. Op deze manier worden ontwerprandvoorwaarden verkregen, die gebruikt kunnen worden bij het ontwerp van de dijken langs de Friese kust.

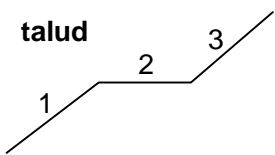
Dijkvak	Waterstand [m]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [s]
23	5,25	1,72	7,11	5,20
24	5,25	1,53	6,80	4,96
31	5,30	1,78	5,61	4,69
32	5,30	1,74	8,83	5,63
33	5,30	1,79		6,35
34	5,30	1,79	9,69	6,35
35	5,30	1,81	9,76	6,37
36	5,35	1,81	9,46	6,24
37	5,35	1,85	9,65	6,39
38	5,40	1,86	9,59	6,44
39	5,40	1,50	6,87	6,66
40	5,40	1,39	7,04	6,86
41	5,45	2,12	10,26	6,53
42	5,45	2,58	7,17	5,29

Tabel 5.3: Ontwerprandvoorwaarden (IP2) voor de Friese kust berekend met het huidige profiel en RAND2001 met +10% correctie op de golfhoogte H_{m0} , +10% correctie op de golfperiodes, een robuustheidtoeslag van 0,10 meter op de waterstand en 10% op de golfhoogte en golfperiode en een klimaattoeslag van 0,35 meter op de waterstand en 0,16 meter op de golfhoogte.

6 Hydraulische toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk toont de resultaten van de berekeningen, die gedaan zijn om de Hydraulische toetsrandvoorwaarden bij lage waterstanden te bepalen. Voor de berekeningen is Hydra-K met de aangepaste Q-variant gebruikt, zie de beschrijving in hoofdstuk 2. De Hydraulische toetsrandvoorwaarden zijn afgeleid voor waterstanden van NAP+ 0,00 meter (of de laagst mogelijke waterstand) met stappen van 0,50 meter tot NAP +4,0 meter. Vanaf een waterstand van NAP +4.0 meter zijn de randvoorwaarden afgeleid voor waterstanden met stappen van 0.1 meter tot het toetspeil van de uitvoerlocatie. In tabel 6.1 is per dijktaalud weergegeven welke bekleding op de dijkprofielen van Ameland en de Friese kust voorkomt. Er zijn drie verschillende types bekleding: beton zuilen, asfalt en gras. Voor deze drie bekledingstypes zijn de berekeningen uitgevoerd.

talud	Ameland huidig profiel	Ameland beoogd profiel	Friese kust huidig profiel	
1	beton zuilen	beton zuilen	asfalt	
2	asfalt	asfalt	asfalt	
3	gras	gras	gras	

Tabel 6.1: Type dijkbekleding op Ameland en langs de Friese kust, geschematiseerd.

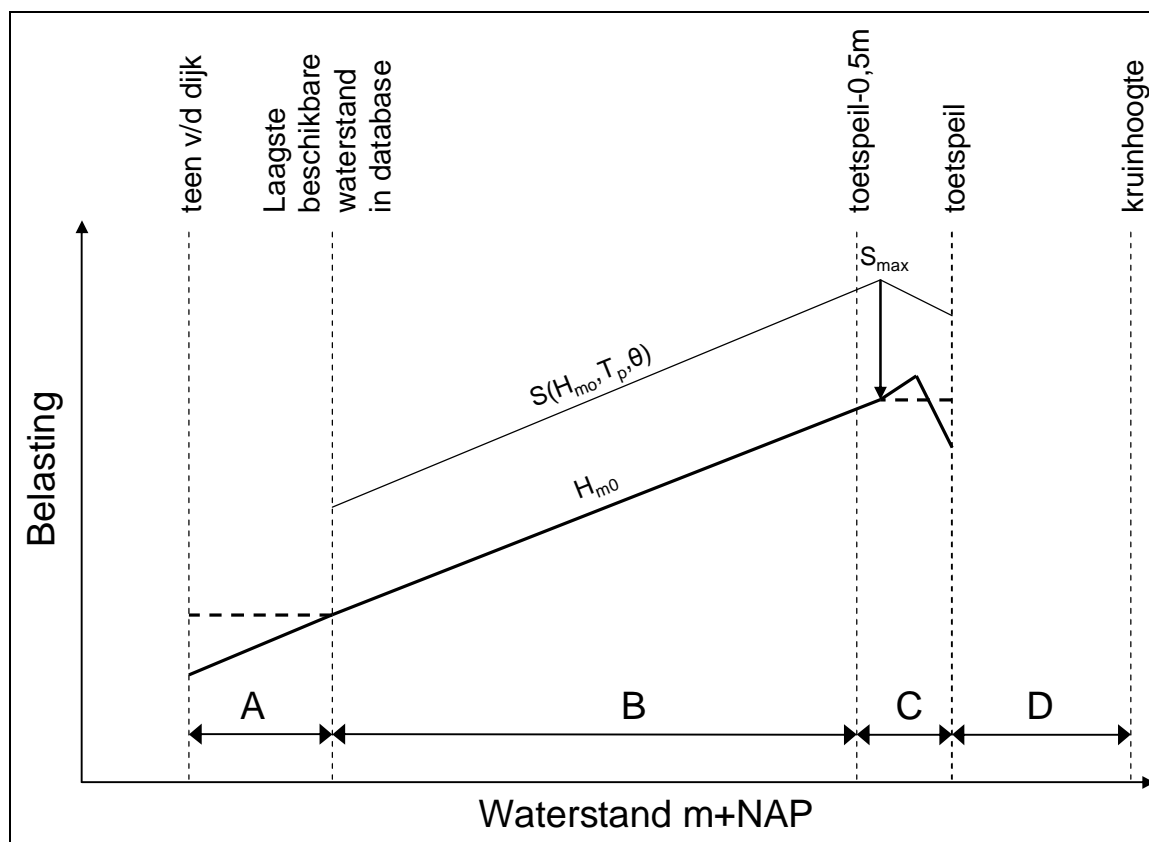
De resultaten van de Hydra-K berekeningen voor Ameland worden in paragraaf 6.2 getoond en voor de Friese kust in paragraaf 6.3.

6.2 Algemene toelichting toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden

Met behulp van Hydra-K kunnen golfbelastingen voor een range aan waterstanden worden bepaald. Hydra-K berekent bij elke waterstand de maatgevende golfbelasting voor een gewenste normfrequentie. De interpretatie en het gebruik van de berekende golfbelastingen hangen af van de gehanteerde waterstand. We onderscheiden daartoe vier delen van het bereik van waterstanden (zie Figuur 6.1):

- Range A: Golfcondities voor waterstanden onder de laagste waterstand in de database
- Range B: Golfcondities tussen de laagste waterstand in de database en een halve meter onder het toetspeil
- Range C: Golfcondities tussen een halve meter onder toetspeil en het toetspeil
- Range D: Golfcondities boven toetspeil

De wijze waarop de bepaalde golfbelastingen binnen elk van de ranges geïnterpreteerd en toegepast dienen te worden wordt onderstaand toegelicht.



Figuur 6.1 Theoretisch verloop van de maatgevende golfhoogte als functie van de waterstand.

Range A: Golfcondities voor waterstanden onder de laagste waterstand in de database

Het kan voorkomen dat Hydra-K geen uitvoer kan genereren voor lage waterstanden, omdat (i) de gevraagde waterstand onder de laagste waterstand in de database ligt of (ii) doordat de uitvoerlocatie droog valt bij lagere waterstanden. In deze gevallen worden de golfcondities gebruikt die berekend zijn voor de laagste waterstand waarbij Hydra-K nog wel uitvoer levert.

Het is aan de gebruiker om, op basis van de beschikbare profielen, na te gaan of er sprake is van een ondiep voorland met dieptebeperking van golven. In dat geval mag de golfhoogte voor de laagste waterstanden gereduceerd worden conform de richtlijn in het VTV. De golfperiode en golfrichting worden niet gecorrigeerd.

Range B: Golfcondities tussen de laagste waterstand in de database en een halve meter onder het toetspeil

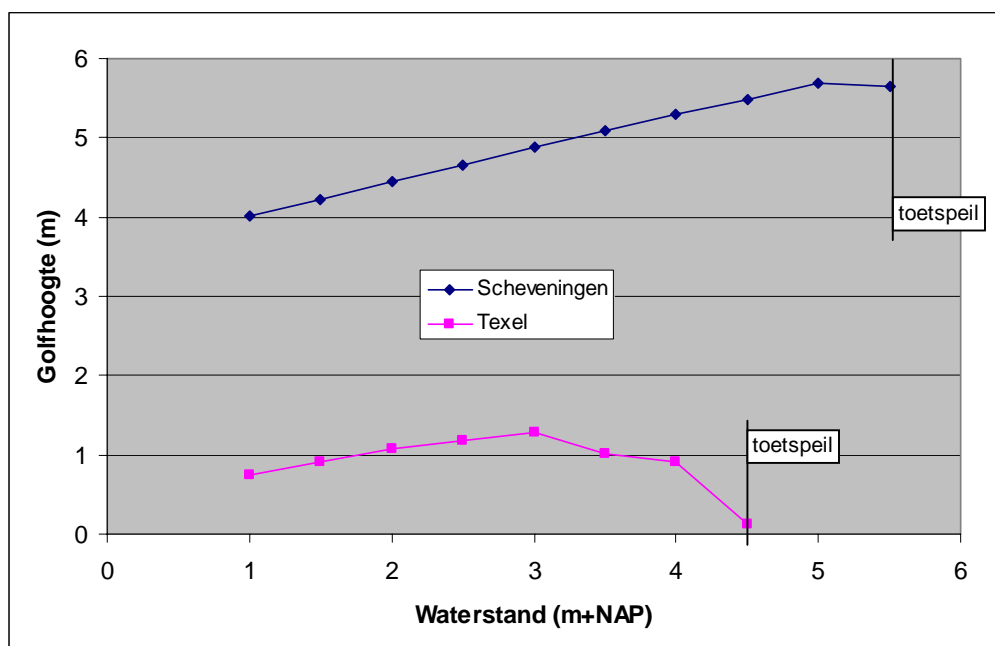
Voor waterstanden tussen de laagste waterstand in de database en een halve meter onder toetspeil kunnen de resultaten van Hydra-K zonder correctie worden toegepast. Een eventuele afname van de golfcondities wordt veroorzaakt door de fysica van het watersysteem (bv. afwaaiing bij hogere waterstanden, waardoor lagere golfhoogten worden berekend).

Range C: Waterstanden tussen een halve meter onder toetspeil en het toetspeil

Boven het toetspeil kan Hydra-K geen maatgevende golfbelasting berekenen omdat de kans op overschrijding van deze waterstand al kleiner is dan de normfrequentie (Range D). Om dezelfde reden neemt de maatgevende golfbelasting bij nadering van het toetspeil soms (iets) af. De golfbelasting bij het toetspeil is dan lager dan bij waterstanden net onder het toetspeil. In onderstaande figuur wordt een voorbeeld gegeven van het genoemde effect. Voor locatie

Scheveningen is de maatgevende golfhoogte bij toetspeil (5.13 m) lager dan bij 5 m (deze 5.13 m staat in de figuur bij 5.5 m).

De afname van de golfhoogte nabij het toetspeil lijkt op het eerste gezicht niet logisch: bij hogere waterstanden worden kleinere golfhoogten berekend. Het feit dat er sprake is van een afname van de golfhoogte bij hogere waterstanden kan verklaard worden op statistische gronden. De afname van de belastingsfunctie komt voort uit het feit dat naarmate de waterstand hoger wordt, steeds meer kansruimte door de waterstand wordt ingenomen, resulterend in een lagere golfhoogte bij deze waterstanden. De uitwisseling komt voort uit subtiele verschillen in de illustratiepunten: bijvoorbeeld 20° variatie in de golfrichting en daarbij ook andere golfhoogte/periodes. Een voorbeeld hiervan is dijkvak 38 aan de Friese Kust (bekledingstype asfalt): hier neemt de golfhoogte nabij het toetspeil met circa 0,10 meter af (ten opzichte van de golfhoogte bij een waterstand van NAP+4,7 meter, Figuur B.26), met een licht toenemende golfperiode met 0,1 seconden (Figuur B.40) en een 20° westelijk draaiende golfrichting. Opgemerkt moet worden dat de variatie (in beperkte mate) wordt beïnvloed door de wijze van aggregatie naar dijkvakken: voor iedere waterstand wordt het profiel met de maximale S-waarde (belastingsfunctie) gebruikt om de golfcondities te bepalen. Echter, analyse van de resultaten laat zien dat dit vaak leidt tot een reductie van de afname van de golfcondities nabij het toetspeil (we hanteren immers het meest ongunstige profiel).



Figuur 6.2: Verloop van de maatgevende golfhoogte als functie van de waterstand.

Het kan ook voorkomen dat net onder toetspeil geen maatgevende belasting kan worden bepaald, zoals bijvoorbeeld voor Texel, waar zich een sterk dalende golfbelasting bij hogere waterstanden voordoet. Voor deze locatie (zie Figuur 6.2) is de maatgevende golfhoogte maximaal bij een waterstand van 3 m. Daarboven vindt afwaaiing plaats. De zeer lage golfhoogte bij toetspeil (4.5 m NAP) kan wederom beïnvloed worden door onvolkomenheden in de keuze van de S-functie. Geadviseerd wordt om ook hier de golfhoogte bij een waterstand van 4 m te gebruiken voor de toetsing bij waterstanden van 4 m NAP tot aan toetspeil.

Voor bekleding ter hoogte van het toetspeil wordt geadviseerd het maximum van de golfbelastingen voor alle waterstanden tot een halve meter onder het toetspeil te gebruiken. Aanbevolen wordt om de golfbelastingen te berekenen voor waterstanden in het interval [toetspeil-0,5m, toetspeil] met een stapgrootte van 0,1 m. De zwaarste van deze berekende golfcondities (uitgedrukt in zwaarste belasting S) dienen dan gebruikt te worden voor alle waterstanden vanaf de waterstand met maximale golfbelasting tot aan het toetspeil (zie Figuur 6.1). Op dit moment moet deze procedure handmatig uitgevoerd worden.

Range D: Waterstanden boven toetspeil

Voor waterstanden boven toetspeil kunnen (vanuit statistisch oogpunt) geen golfcondities met de normfrequentie worden vastgesteld. Immers, de kans van overschrijden van een waterstand boven toetspeil is kleiner dan de normfrequentie (toetspeil is de combinatie die exact met de normfrequentie wordt overschreden). Daarnaast dient de bekleding boven toetspeil niet getoetst te worden op golfklappen, maar op belasting in de oploopzone welke gebaseerd is op golfcondities behorende bij toetspeil.

6.3 Vergelijking met randvoorwaarden voor hoogte (golfoverslag) bij toetspeil

Het faalmechanisme instabiliteit van bekleding heeft andere maatgevende condities dan het 'standaard' faalmechanisme golfoverslag. Een zware storm waarbij de waterstanden relatief laag blijven veroorzaakt bijvoorbeeld wel veel golfbelasting op de lagere taluddelen van een dijk, maar nauwelijks golfoverslag. Deze storm is dus voor de bekleding wel relevant, maar voor de hoogte van de dijk niet. Daardoor zullen de randvoorwaarden voor toetsing van bekleding afwijken van die voor toetsing op hoogte.

Aan de andere kant zijn de belastingfuncties voor bekleding en overslag wel gecorreleerd. Een storm die veel golfoverslag veroorzaakt zal ook een zware golfbelasting leveren op de hogere taluddelen. Daarom verwachten we dat de golfrandvoorwaarden voor bekledingen bij hoge waterstanden in de buurt zullen liggen van de maatgevende condities voor golfoverslag. We hebben het dan over het zogenaamde eerste illustratiepunt (IP1), waarbij de waterstand en golfcondities volgen uit de statistiek van waterstanden en wind. Het IP1 is de meest voorkomende combinatie van waterstand en wind (en golven) bij de gegeven overschrijdskans voor het faalmechanisme golfoverslag.

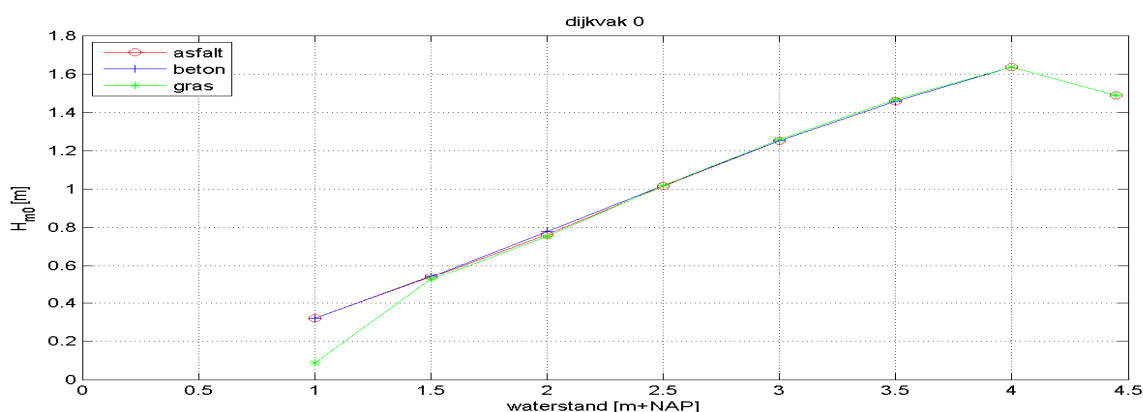
In de Randvoorwaardenboeken staat echter niet het IP1 maar het tweede illustratiepunt (IP2). Het IP2 wordt bepaald door een aanvullende voorwaarde te stellen: de waterstand moet gelijk zijn aan het toetspeil. Het overslagdebiet moet daarbij gelijk blijven aan dat in het IP1. Dit heeft tot gevolg dat de golfcondities in het IP2 veel lager zijn dan in het IP1. Voor de toetsing op hoogte maakt dat niet uit. Het overslagdebiet is immers gelijk. Maar de vergelijking met randvoorwaarden voor bekledingen is niet langer mogelijk. De golfcondities in het IP2 zijn als het ware kunstmatig verlaagd. Daarom zijn de golfcondities in het IP2 (zoals weergegeven in het randvoorwaardenboek) in veel gevallen lager dan de maatgevende golfcondities voor bekledingen.

6.4 Toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden voor Ameland

De resultaten voor het faalmechanisme bekleding voor Ameland zijn te vinden in bijlage B, tabel B.1 gesorteerd op dijkvak. Voor elk dijkvak zijn de golfhoogte (H_{m0}), de piekperiode (T_{pm}), de golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de golfrichting (Dir) gegeven voor de bekledingstypes beton zuilen, asfalt en gras, voor waterstanden in de range van NAP +0 meter tot het toetspeil. Voor de meeste waterstanden lager dan NAP +1 meter zijn geen antwoorden beschikbaar, omdat

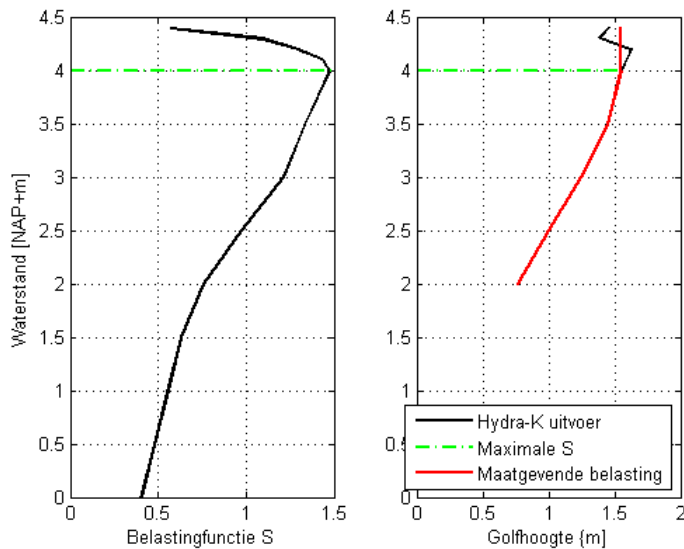
de RAND2001 database voor deze waterstanden geen gegevens bevat. Ook kan het in sommige gevallen voorkomen dat de bodemhoogte hoger is dan de opgegeven waterstand, waardoor als gevolg van droogval geen resultaten voor die waterstand worden berekend.

Figuur 6.1 toont de golfhoogte in relatie tot de waterstand voor dijkvak 0. Voor de overige dijkvakken zijn soortgelijke figuren voor golfhoogte en golfperiode gemaakt. Deze worden in bijlage B, figuren B.1 t/m B.16 getoond.



Figuur 6.3: Golfhoogte als functie van de waterstand op dijkvak 0 voor Ameland

De resultaten laten in de meeste gevallen een afname van de golfhoogte zien bij toenemende waterstand (net onder het toetspeil). Deze afname wordt deels veroorzaakt door de statistiek aanwezig in Hydra-K. Conform Deltares (2011) zijn daarom voor waterstanden tussen toetspeil en 0,5 meter beneden het toetspeil niet de feitelijk berekende golfcondities gehanteerd, maar de golfcondities welke behoren bij de waterstand waarvoor de belastingsfunctie (tussen toetspeil en 0,5 meter beneden toetspeil) maximaal is. Zoals te zien is in Figuur 6.4, is de waterstand waarvoor de belastingsfunctie maximaal is lager dan het toetspeil (NAP +4,40 m in dit geval). Voor de waterstanden tussen maximale belastingsfunctie en toetspeil wordt de belasting behorende bij de maximale belastingsfunctie gehanteerd, in dit geval bij een waterstand van NAP +4,0 m.

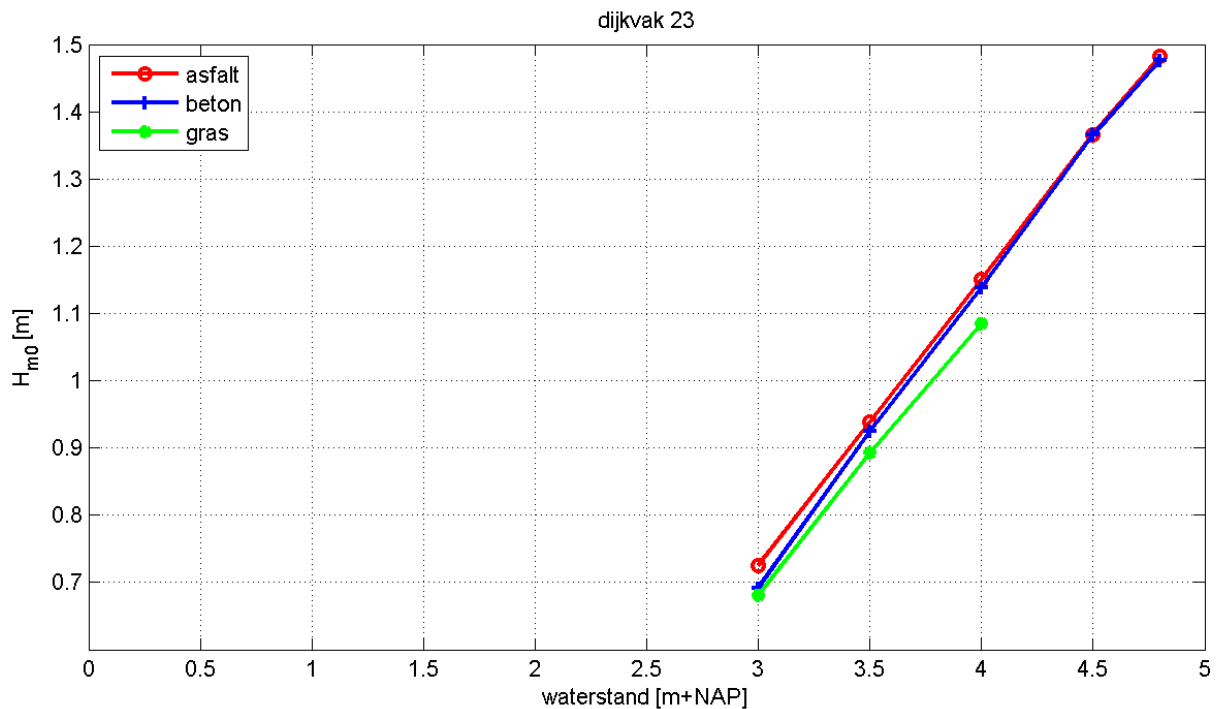


Figuur 6.4 Voorbeeld verloop belastingsfunctie en resulterende maatgevende belasting

6.5 Toets-randvoorwaarden bij lage waterstanden voor de Friese kust

De resultaten voor het faalmechanisme bekleding voor de Friese kust staan in bijlage B, tabel B.2 gesorteerd naar dijkvak. Voor elk dijkvak zijn de golfhoogte (H_{m0}), de piekperiode (T_{pm}), de golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de golfrichting (Dir) gegeven voor de bekledingstypes beton zuilen, asfalt en gras, voor waterstanden in de range van NAP +0 meter tot het toetspeil. Evenals voor Ameland zijn niet voor alle opgegeven waterstanden golfrandvoorwaarden berekend.

Figuur 6.3 toont de golfhoogte in relatie tot de waterstand voor dijkvak 23. Voor de overige dijkvakken zijn soortgelijke figuren voor golfhoogte en golfperiode gemaakt. Deze worden in bijlage B, figuren B.17 tot en met B.44 getoond.



Figuur 6.5: Golfhoogte als functie van de waterstand op dijkvak 0 voor de Friese kust

Ook de resultaten voor de Friese Kust laten vaak een afname van de golfhoogte zien bij toenemende waterstanden (net onder toetspeil). Net als voor de dijkvakken op Ameland zijn, conform Deltares (2011) ook voor de Friese Kust voor waterstanden tussen toetspeil en 0,5 meter beneden toetspeil de golfcondities gehanteerd behorende bij het niveau waarop de belastingfunctie maximaal is.

6.6 Afleiden van ontwerprandvoorwaarden bij lagere waterstanden

In voorgaande paragrafen zijn de hydraulische toets-randvoorwaarden afgeleid bij verschillende waterstanden. Conform het advies van Rijkswaterstaat (2010) kunnen hieruit ontwerprandvoorwaarden worden afgeleid door dezelfde robuustheidstoelagen te hanteren als bij de ontwerpwaterstand. Met andere woorden, de significante golfhoogte H_{m0} en de golfperiodes $T_{m-1,0}$ en T_{pm} in de tabellen B.1 en B.2 dienen allen met 10% te worden verhoogd. De verkregen ontwerprandvoorwaarden zijn geldig bij in deze tabellen genoemde waterstanden. Voor de overzichtelijkheid hebben we de tabellen met ontwerprandvoorwaarden niet gepresenteerd. Deze zijn eenvoudig met bovenstaand voorschrift te bepalen.

7 Effect geulmigratie Borndiep

7.1 Inleiding

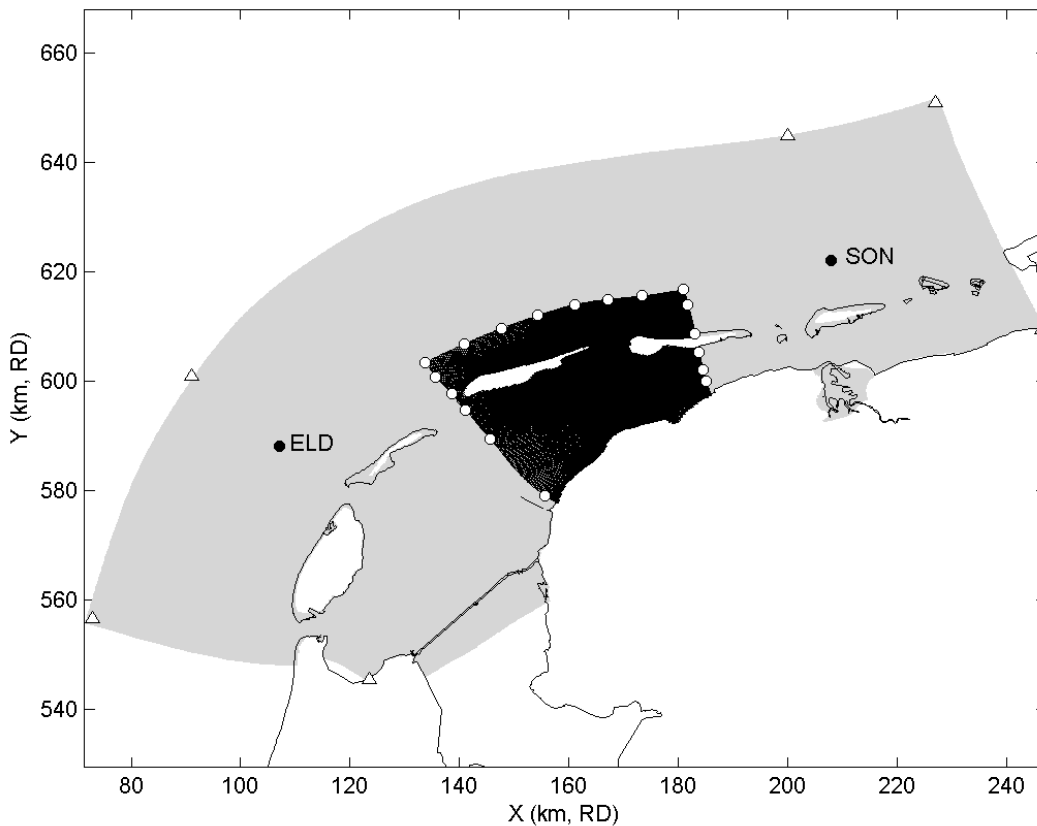
Aan de westzijde van Ameland bevindt zich de getijdegeul Borndiep. Deze geul is onderdeel van het dynamische morfologische systeem van de Waddenzee. Als gevolg van de morfologische dynamiek lijkt deze geul zich oostwaarts (richting Ameland) te verplaatsen. De migratie van de geul leidt tot een verdieping van de bodem juist voor de dijkvakken '0' en '1'. De verdieping kan leiden tot een toename van de hydraulische belasting op deze dijkvakken, doordat golven komende vanuit het (noord) westen later de bodem voelen en mogelijk dichter bij de kust gedempt worden.

De invloed van de geulmigratie is in kaart gebracht door de golfcondities op verschillende afstanden van het Borndiep te bepalen met het golfmodel SWAN. De resultaten van de SWAN berekening zijn vervolgens gebruikt om inzicht te geven in het effect van de geulmigratie op de Hydraulische Randvoorwaarden voor dijkvak "0" en "1". De opzet van de SWAN berekening wordt besproken in paragraaf 7.2. In paragraaf 7.3 is het effect van de geulmigratie met behulp van de SWAN resultaten geanalyseerd.

7.2 SWAN model

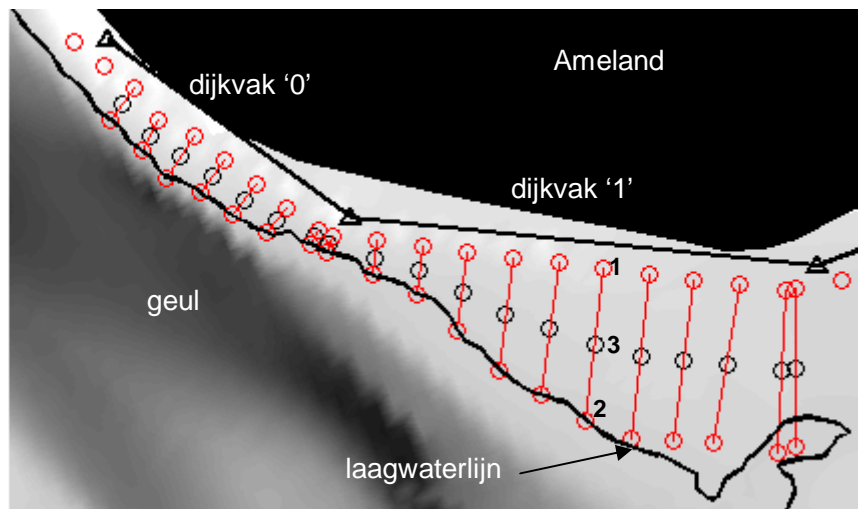
Met SWAN (versie 40.72ABCDE) is één berekening gemaakt. Voor deze berekening is het Waddenzee model en een genest fijner Amelandse Zeegat (AZG) model gebruikt, zie respectievelijk het grijze en zwarte rooster in figuur 7.1. Een beschrijving van beide modellen is te vinden in Witteveen+Bos (2008). De fysische en numerieke instellingen voor de beide SWAN modellen zijn overgenomen uit Witteveen+Bos (2008). Voor de effect analyse is bewust voor de meest recente SWAN versie met bijbehorende instellingen gekozen, omdat deze beter aansluit op de toekomstige HR 2011 getallen. Dit betekent dat resultaten uit deze exercitie zullen verschillen met getallen uit de RAND2001 database.

Het Waddenzee model is aangestuurd met de offshore wind- en waterstands randvoorwaarden behorende bij een 1/2000 jaar storm voor het werkelijke dijkprofiel van dijkvak '0' (zie tabel 3.3): uniform windveld ($U_{10} = 24.1$ m/s; $\theta_w = 273^\circ\text{N}$) en een uniform waterstandsveld (NAP +4,40 m). Stroming is niet in rekening gebracht. De offshore golfrandvoorwaarden behorende bij de 1/2000 jaar storm voor het Waddenzee model zijn afgeleid van de extreme waarden statistiek voor Eierlandse Gat (ELD) en Schiermonnikoog Noord (SON) uit HKV (2010). Voor het AZG model zijn hetzelfde wind- en waterstandsveld gebruikt. De golfrandvoorwaarden voor het AZG model volgen uit de resultaten van het Waddenzee model (nesting).



Figuur 7.1: Waddenzee model en Ameland Zeegat model, (witte driehoekjes: golfrandvoorwaarden Waddenzee model, witte cirkels: golfrandvoorwaarden AZG model)

De golfcondities uit de SWAN resultaten zijn bepaald bij (1) de teen van de dijk op de in Hydra-K gedefinieerde uitvoerlocaties, (2) de originele geulwand ter plaatse van de laagwaterlijn en (3) halverwege punten (1) en (2), zie figuur 7.2. Locaties (1) geven de golfcondities van het huidige scenario. Locaties (2) zijn representatief voor de golfcondities bij een maximaal scenario; een extreme geulmigratie. De afstand, die de geul in dit geval verschuift is per uitvoerlocatie verschillend, zie figuur 7.2. Locaties (3) zijn representatief voor een midden scenario.



Figuur 7.2: Locaties golfconditie bepaling

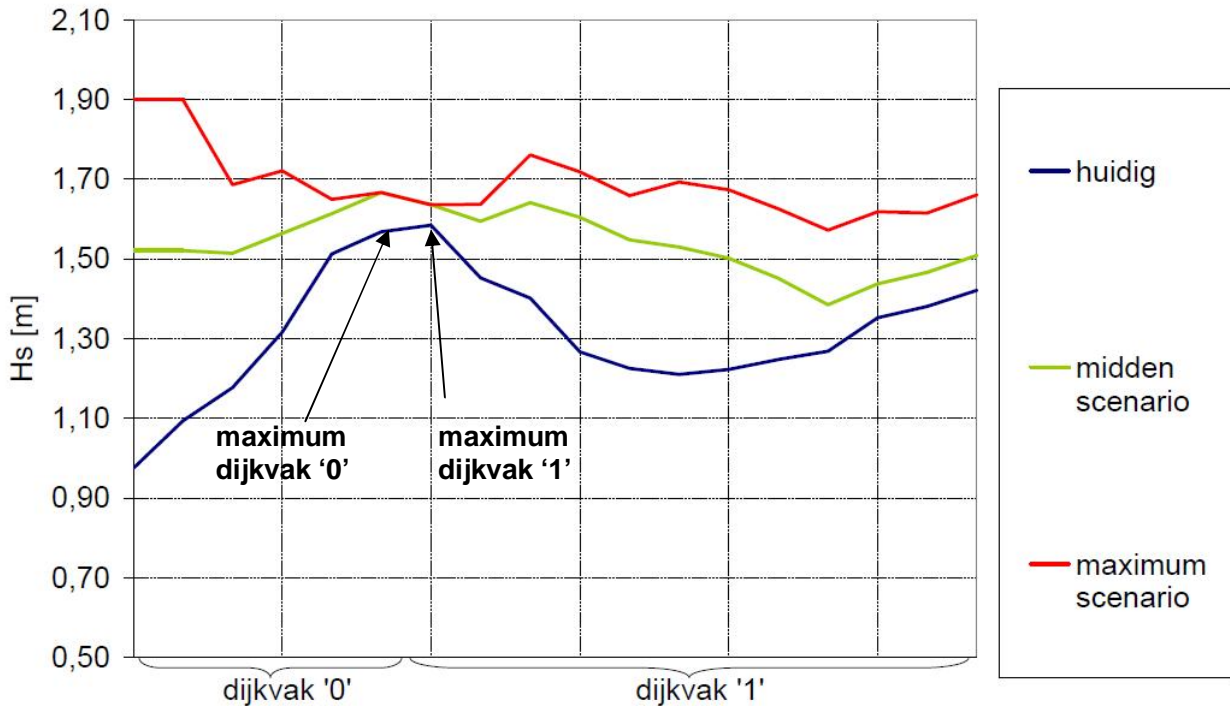
7.3 Significante golfhoogte in relatie tot de afstand tot de geul

De met SWAN berekende golfcondities uit het huidige scenario zijn vergelijkbaar met de golftrandvoorwaarden die in hoofdstuk 3 voor de huidige profielen zijn berekend. Verschillen in golfhoogte beperken zich tot ongeveer 0,3 meter. Deze verschillen treden op omdat verschillende SWAN modellen en versies gebruikt zijn.

Om het effect van de geulmigratie te kunnen inschatten, is voor elk scenario (2) en (3) en elke uitvoerlocatie langs de dijkvakken '0' en '1' de verandering in golfhoogte ten opzichte van de golfhoogte op locaties (1) bepaald. Hiermee wordt een factor van golfhoogte verandering bij geulmigratie verkregen. Vervolgens zijn de golftrandvoorwaarden voor de dijkvakken '0' en '1', bepaald in hoofdstuk 3, vermenigvuldigd met deze factor.

Het resultaat hiervan is te zien in figuur 7.3. De blauwe lijn laat de golfhoogtes voor de dijkvakken '0' en '1', bepaald in hoofdstuk 3, zien. De groene en rode lijnen geven de resultaten van de scenario's van een midden en een maximale geulmigratie.

Zoals te verwachten geeft het huidige scenario de laagste golfhoogtes en het maximum scenario de hoogste golfhoogtes. Opvallend is dat het verschil tussen de verschillende scenario's klein is ter plaatse van de maxima $H_{m0} * T_{m-1,0}$ van het huidige scenario. De reden hiervoor is dat op deze locatie de laagwaterlijn al vrij dicht bij de dijk ligt, zie figuur 7.2 (einde dijkvak '0' en begin dijkvak '1').



Figuur 7.3: Geulmigratie scenario's huidig, midden en maximum

Voor elk scenario is aangenomen dat de maximale golfhoogte in het dijkvak maatgevend is. De maximale golfhoogtes van de dijkvakken '0' en '1' zijn in tabel 7.1 getoond. Let op, dit zijn toets-golfhoogtes. Om de ontwerp-golfhoogtes te bepalen moeten de gebruikte toeslagen van hoofdstuk 5 bij de golfhoogtes worden opgeteld. De berekeningen laten zien dat de geulmigratie geen significante invloed heeft op de te hanteren golfperiode.

	huidig scenario H_{m0} [m]	midden scenario H_{m0} [m]	maximum scenario H_{m0} [m]
dijkvak 0	1,57	1,67	1,90
dijkvak 1	1,58	1,64	1,76

Tabel 7.1: Effect van geulmigratie op de (toets-) golfhoogte.

8 Conclusies

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de conclusies van de verschillende vraagstukken gepresenteerd. Paragraaf 8.2 gaat in op de conclusies ten aanzien van de afgeleide Hydraulische toets- en ontwerp randvoorwaarden. In paragraaf 8.3 worden de conclusies beschreven van de Hydraulische toetsrandvoorwaarden voor lage waterstanden. Ten slotte wordt in paragraaf 8.4 de geulmigratie van het Borndiep behandeld.

8.2 Conclusies Hydraulische Randvoorwaarden

In deze studie zijn Hydraulische toets- en ontwerp randvoorwaarden bepaald met een probabilistische aanpak (Hydra-K) voor de dijkvakken 0 tot en met 6 aan de Waddenzee-zijde van Ameland en voor de dijkvakken 23, 24, 31 tot en met 42 langs de Friese kust. Om erachter te komen of berekende maatgevende golfcondities bij Ameland en de Friese kust afhankelijk zijn van het in de berekening gebruikte dijkprofiel, zijn de Hydraulische toetsrandvoorwaarden zowel voor een standaardprofiel als voor het werkelijke en (alleen voor Ameland) beoogde profiel berekend. De berekeningen zijn uitgevoerd met de gecorrigeerde RAND2001 database (met een correctie van 10% op de H_{m0} en de $T_{m-1,0}$) om rekening te houden met mogelijke modelfouten in SWAN.

Voor de meeste dijkvakken geeft het huidige profiel de laagste belasting. Bij Ameland geeft het beoogde profiel in alle gevallen de hoogste belasting. Voor het beoogde profiel is belasting hoger omdat dat het huidige profiel een flauwer boventalud heeft dan het beoogde profiel. De verschillen in golfrandvoorwaarden zijn echter klein, omdat de beschouwde profielen onderling niet veel verschillen.

De HR2006 geven in de meeste gevallen een conservatievere waarde dan de berekende maatgevende toets-golfhoogtes in de huidige studie. De op metingen en ontwerpcondities gebaseerde HR2006 is op enkele dijkvakken van Ameland en de Friese kust lager dan of gelijk aan de berekende toets-golfhoogte met Hydra-K. De deterministisch bepaalde golfhoogtes voor Ameland van Deltares (2007) zijn zoals verwacht in alle gevallen conservatiever dan de met Hydra-K berekende toets-golfhoogtes. Voor de Friese kust zijn de deterministisch bepaalde golfhoogtes in de meeste gevallen conservatiever dan de met Hydra-K berekende toets-golfhoogtes. Voor de dijkvakken 31, 41 en 42 is dit niet het geval.

Er is geen vergelijking gemaakt tussen de met Hydra-K berekende toets-golfperiodes en de HR2006, aangezien deze in de HR2006 niet gegeven zijn voor de dijkvakken van Ameland en de Friese kust. De deterministisch bepaalde golfperiodes zijn zoals verwacht voor zowel Ameland uit WL (2007) als voor de Friese kust uit Deltares (2009b) voor alle dijkvakken conservatiever dan de met Hydra-K berekende toets-golfperiodes voor Ameland en Friesland.

Voor het toetsen van de waterkeringen met de indicatieve Hydraulische Randvoorwaarden kan gebruik worden gemaakt van de Hydraulische toetsrandvoorwaarden gepresenteerd in tabel 3.3 voor Ameland en in tabel 4.3 voor de Friese kust. Hierbij wordt opgemerkt dat het hier indicatieve Hydraulische Randvoorwaarden betreft, welke mogelijk kunnen afwijken van de later vast te stellen HR2011. De belangrijkste oorzaak voor de mogelijke verschillen ligt in het feit dat WTI gebruik zal maken van SWAN-resultaten die nu nog niet beschikbaar zijn.

Voor het ontwerp van de dijkversterking dient gebruik te worden gemaakt van de Hydraulische ontwerprandvoorwaarden gepresenteerd in tabel 5.2 voor Ameland en in tabel 5.3 voor de Friese kust.

8.3 Conclusies Hydraulische Randvoorwaarden bij lage waterstanden

Daarnaast zijn Hydraulische toetsrandvoorwaarden bij lagere waterstanden bepaald voor zowel Ameland als de Friese Kust. Voor de berekeningen is Hydra-K met aangepaste Q-variant gebruikt. De Hydraulische Randvoorwaarden zijn afgeleid voor waterstanden van NAP+ 0,00 meter met stappen van 0,50 meter tot NAP +4,0 meter en met stappen van 0,1 meter van NAP +4,0 meter tot het toetspeil van de uitvoerlocatie. Er zijn drie verschillende types bekleding: beton zuilen, asfalt en gras. Voor deze drie bekledingstypes zijn de berekeningen uitgevoerd. Tabellen B.1 en B.2 tonen voor Ameland en de Friese kust de resultaten van de berekeningen voor bekleding.

Conform Deltares (2011) zijn de golfcondities bepaald behorende bij de hoogste waarden van de belastingfunctie binnen de range van waterstanden tussen toetspeil en toetspeil minus 0,5 meter.

8.4 Conclusies effect geulmigratie

Als gevolg van de morfologische dynamiek lijkt de geul Borndiep zich oostwaarts (richting Ameland) te verplaatsen. De migratie van de geul leidt tot een verdieping van de bodem voor de dijkvakken '0' en '1' en dit kan leiden tot een toename van de hydraulische belasting op deze dijkvakken.

De invloed van de geulmigratie is in kaart gebracht door de golfcondities op verschillende afstanden van het Borndiep te bepalen met het golfmodel SWAN. Het effect van de geulmigratie is voor twee verschillende scenario's bepaald: een midden en een maximaal scenario. De resultaten voor de verschillende scenario's zijn te vinden in tabel 7.1 en laten zien dat er beperkte toename van golfhoogte kan worden verwacht bij een landwaartse geulmigratie.

9 Referenties

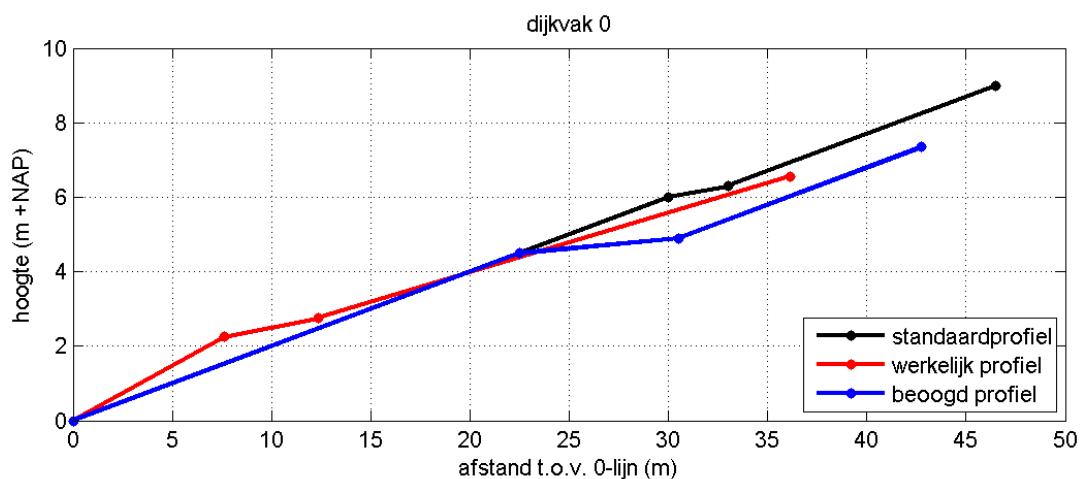
- Alkyon (1999), Wave computations in the Waddenzee. Alkyon rapport A352, November 1999.
- Deltares (2009a), Depth-induced breaking in SWAN under finite depth wave growth conditions. A.J. van der Westhuysen, Deltares rapport H5107.40, februari 2009.
- Deltares (2009b), Hydraulische Randvoorwaarden Waddenzeedijk Noord-Friesland. Deltares rapport H5242.00, januari 2009.
- Deltares (2010a). Vergelijking deterministische en probabilistische aanpak t.b.v. bepaling van HR voor harde keringen op Texel. Deltares rapport 1201519-013-GEO-0001, juni 2010.
- Deltares (2010b). Golfcondities voor zeedijken Texel, op basis van geschematiseerde actuele dijkprofielen. Deltares rapport 1201519-021-GEO-0004, september 2010.
- Deltares (2010c). Toeslag golfrandvoorwaarde spuicomplex Kornwerderzand. Deltares memo 1202341-002-HYE-0016, april 2010.
- Deltares (2011). Memo bij uitlevering van tesetversie Hydra-K bekledingen. J. Beckers. 19 januari 2011.
- Dongerren, van A., A.J. van der Westhuysen, J. Groeneweg, G. van Vledder, J. Lansen, A. Smale, C. Gautier, H. Peters and I. Wenneker (2010). Spectral wave modelling in tidal inlets seas: results from the SBW Wadden Sea project. ICCE 2010, in press.
- HKV & Alkyon (2010), Hydra-K versie 3.6.1, Functionele documentatie, Basisversie WTI2011 met aangepaste Q-variant. HKV rapport PR1959, september 2010.
- HKV (2010), Diepwaterrandvoorwaarden WTI-2011 (ELD, EUR, YM6, SCW en SON). HKV rapport PR1759.10, februari 2010.
- KNMI (2001). Climate scenarios for impact studies in the Netherlands. G.P. Können, De Bilt, The Netherlands, May 2001.
- RIKZ (2006), Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en Estuaria, Hydraulische Randvoorwaarden 2006. RWS RIKZ Rapport 2006.029. F. den Heijer, R.J. Vos, F.L.M. Diermanse, J. Groeneweg en R. Tönis. November 2008
- Rijkswaterstaat (2010), Memo 'Vaststelling uitgangspunten hydraulische ontwerprandvoorwaarden voor de Afsluitdijk', 23 april 2010
- Witteveen+Bos (2008), Hindcast of the 8 and 9 November 2007 storm for the tidal inlet of Ameland. Witteveen+Bos rapport DT293-2, November 2008.
- Witteveen+Bos (2009), Tekening dijkverbetering Waddenzeedijk Ameland, Alternatief dubbele berm binnenwaarts variant – dwarsprofielen, principe bekleding. Witteveen+Bos tekening AME-1-2006, juni 2009.

WL (2007), Memo golfcondities Ameland. WL | Delft Hydraulics memo H3947.30, mei 2007.

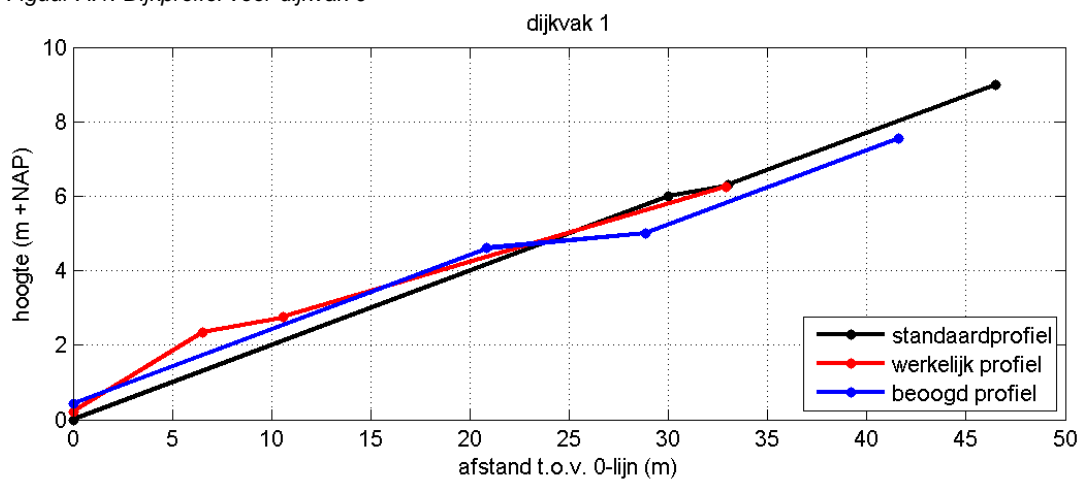
A Dijkprofielen Ameland en de Friese kust

Dijkprofielen Ameland

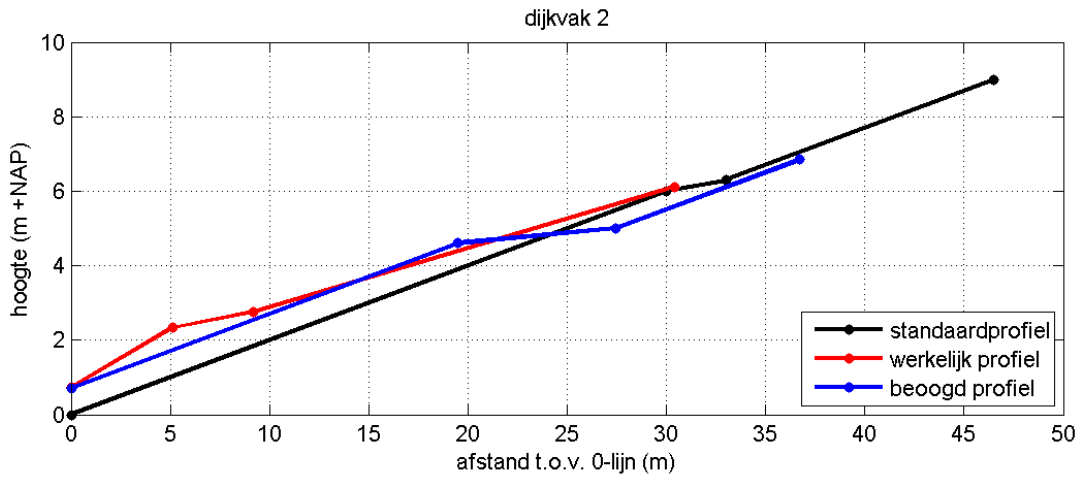
De geschematiseerde dijkprofielen van Ameland zijn gebaseerd op overzichtstekeningen van Witteveen+Bos. Voor elk dijkvak is een representatief dwarsprofiel gekozen.



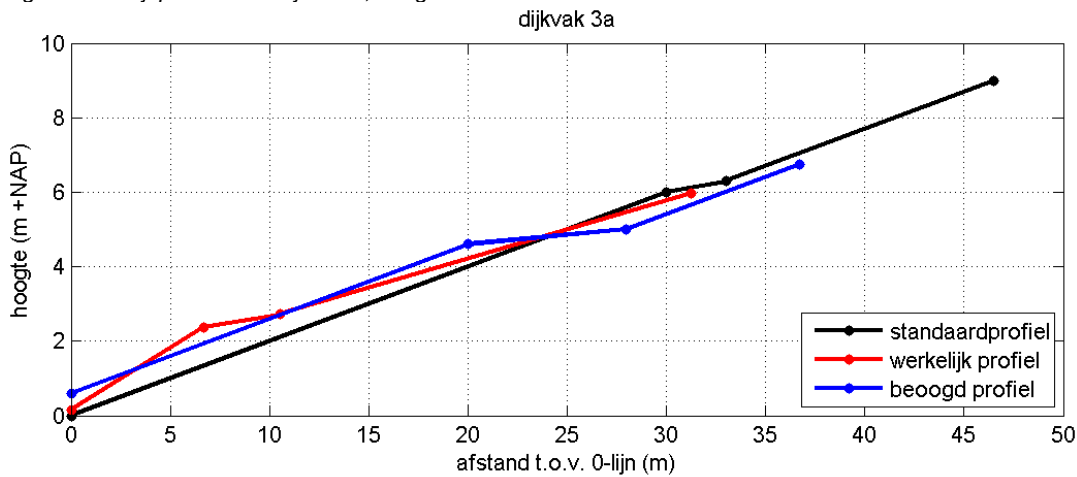
Figuur A.1: Dijkprofiel voor dijkvak 0



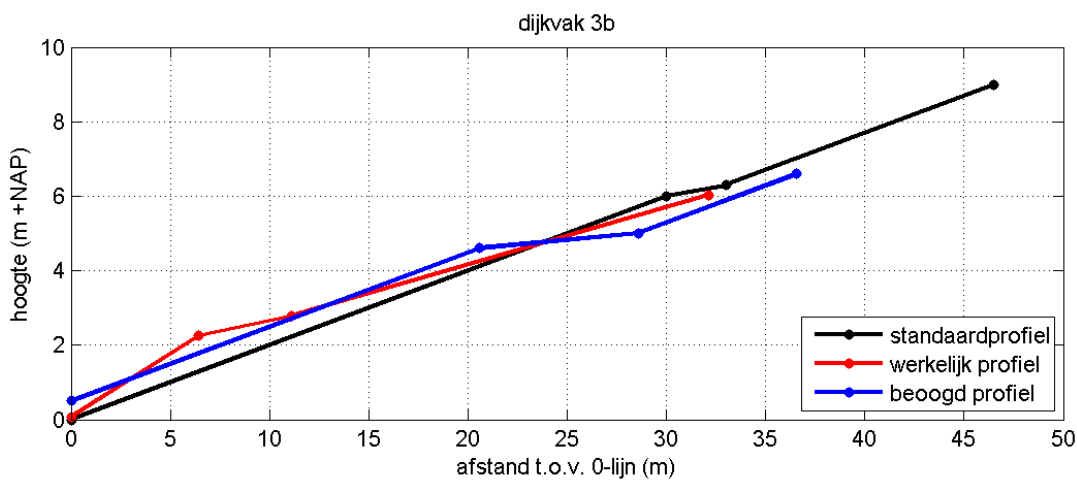
Figuur A.2: Dijkprofiel voor dijkvak 1, Vogelpolle



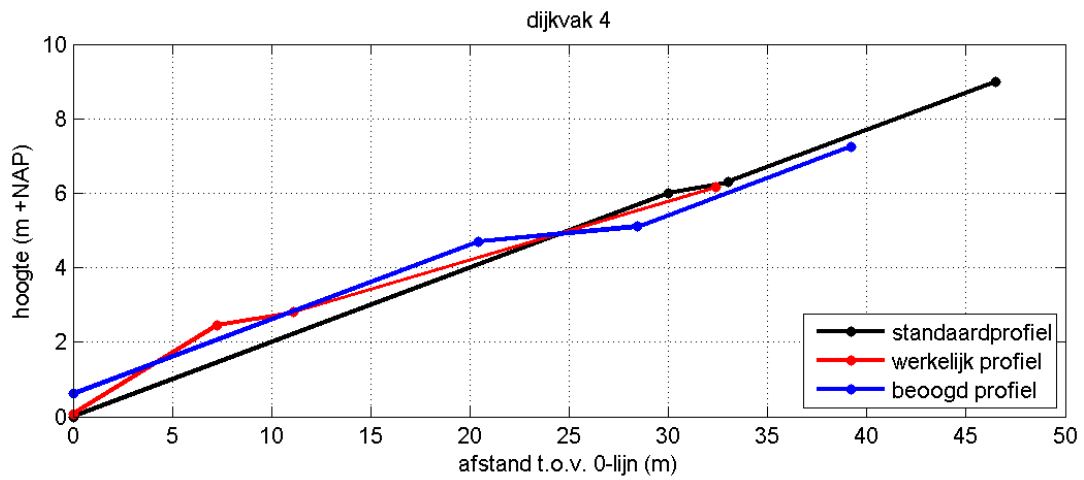
Figuur A.3: Dijkprofiel voor dijkvak 2, Lange Sloot



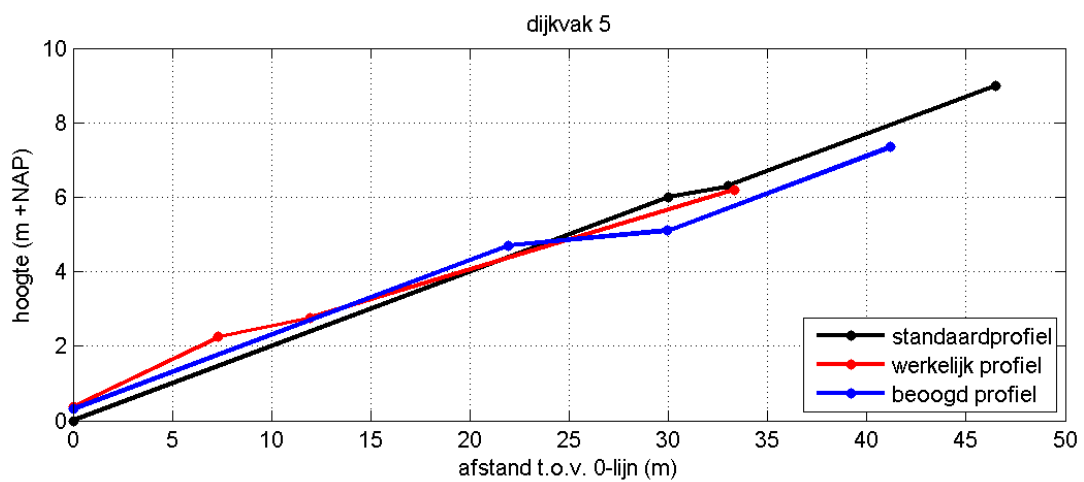
Figuur A.4: Dijkprofiel voor dijkvak 3a, Oostergie



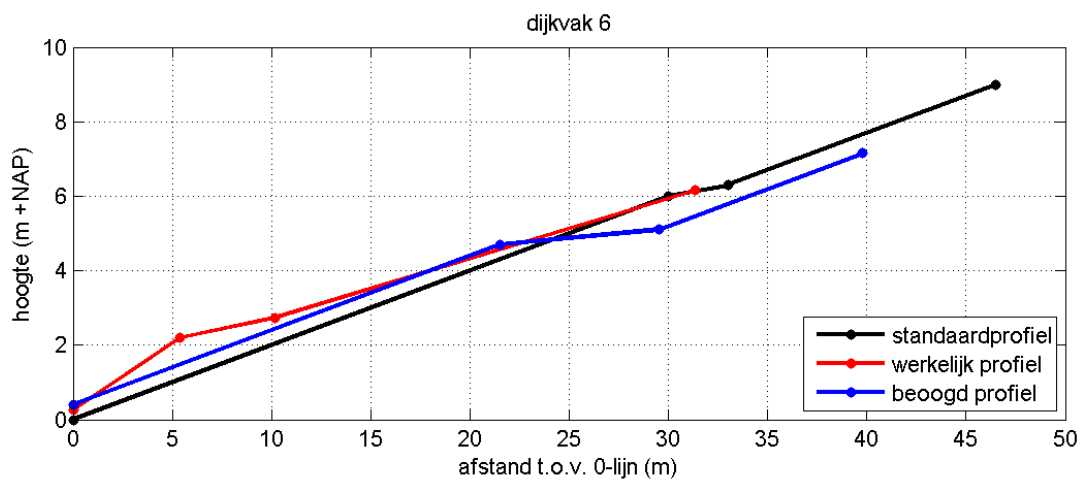
Figuur A.5: Dijkprofiel voor dijkvak 3b, Ballumerbocht



Figuur A.6: Dijkprofiel voor dijkvak 4, Schorumweg



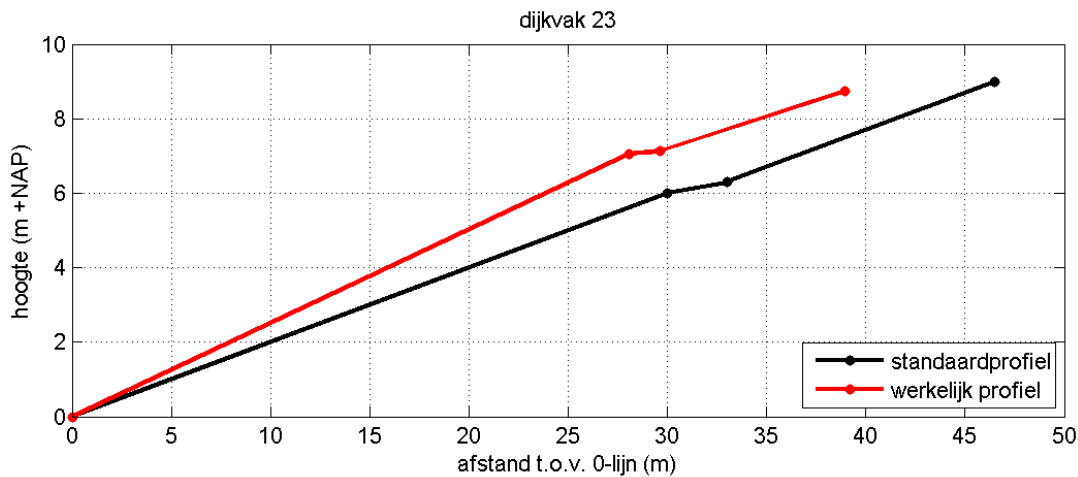
Figuur A.7: Dijkprofiel voor dijkvak 5, Polder Nes



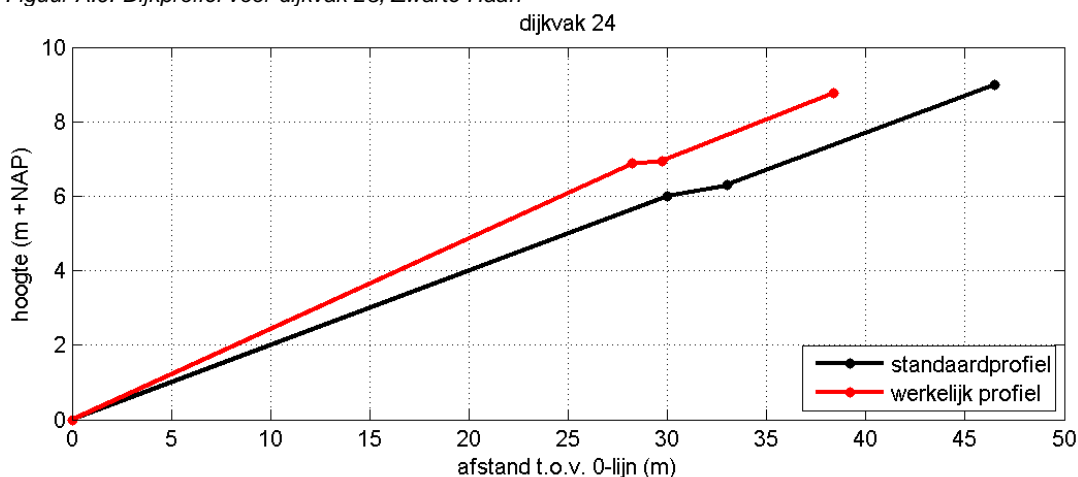
Figuur A.8: Dijkprofiel voor dijkvak 6, Buurdergie

Dijkprofielen Friese kust

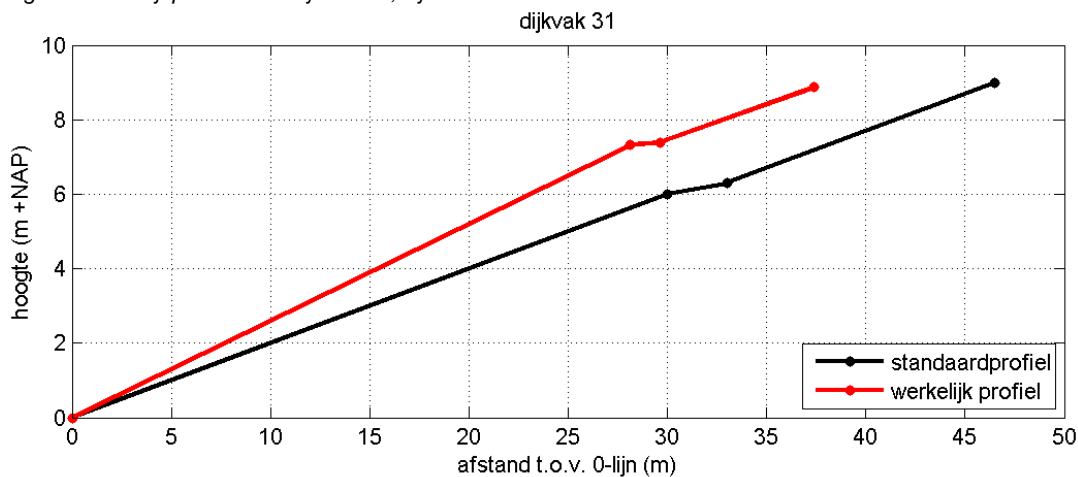
De geschematiseerde dijkprofielen van Friese kust zijn gebaseerd op overzichtstekeningen van het Wetterskip Fryslân. Voor elk dijkvak is een representatief dwarsprofiel gekozen.



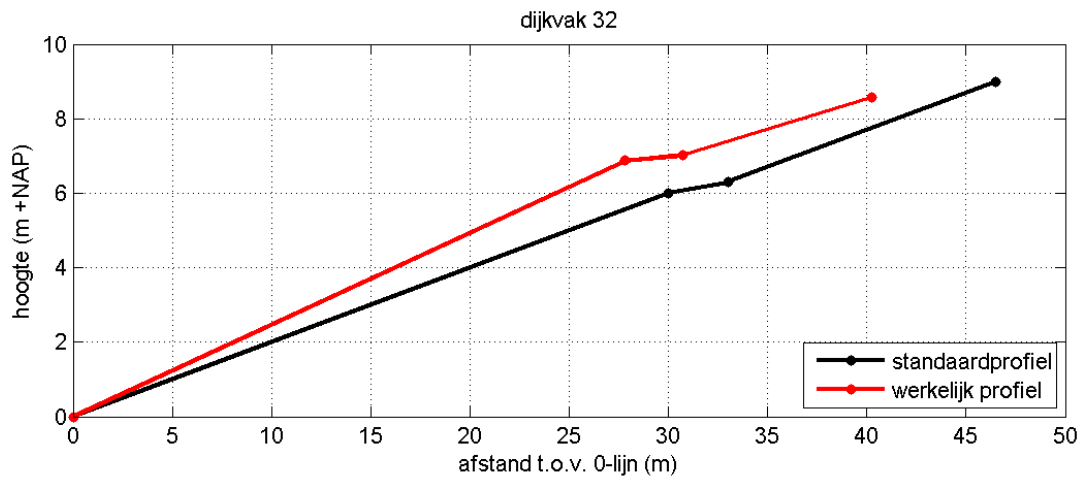
Figuur A.9: Dijkprofiel voor dijkvak 23, Zwarte Haan



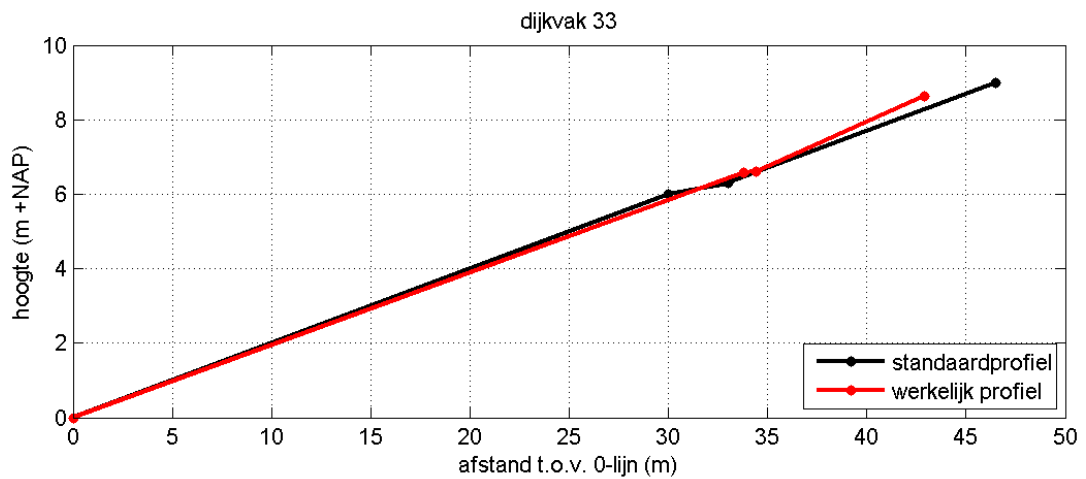
Figuur A.10: Dijkprofiel voor dijkvak 24, Sjoukeshoek



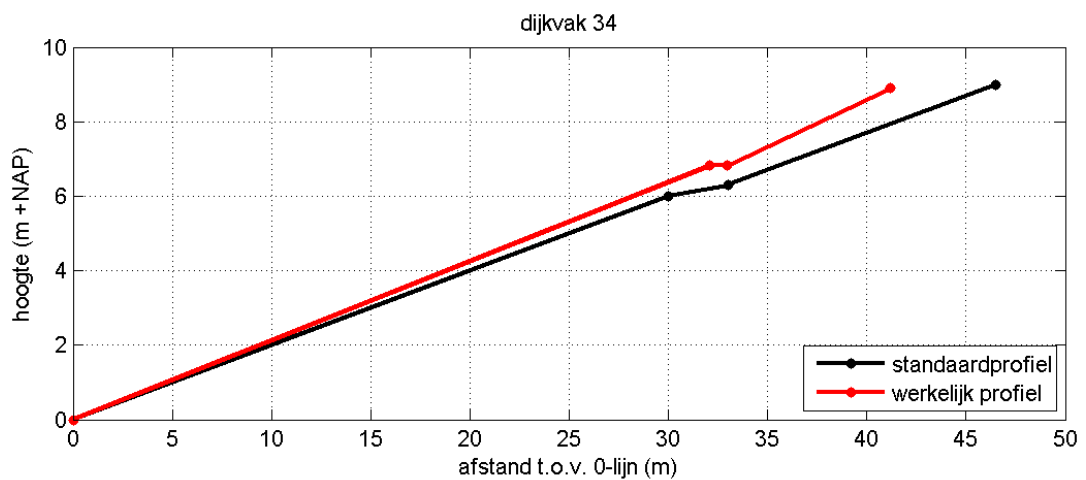
Figuur A.11: Dijkprofiel voor dijkvak 31, Einde armdijk Holwerd



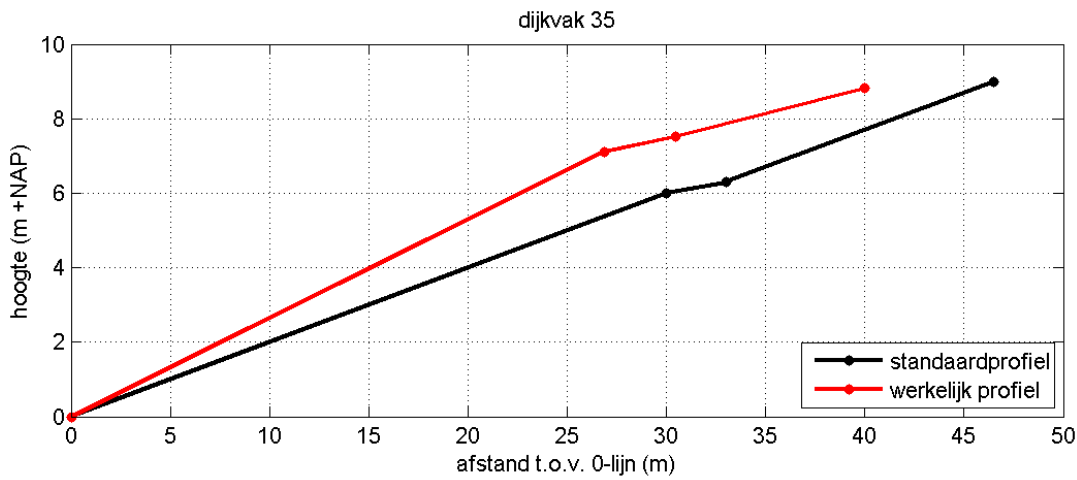
Figuur A.12: Dijkprofiel voor dijkvak 32, Veerdam Holwerd



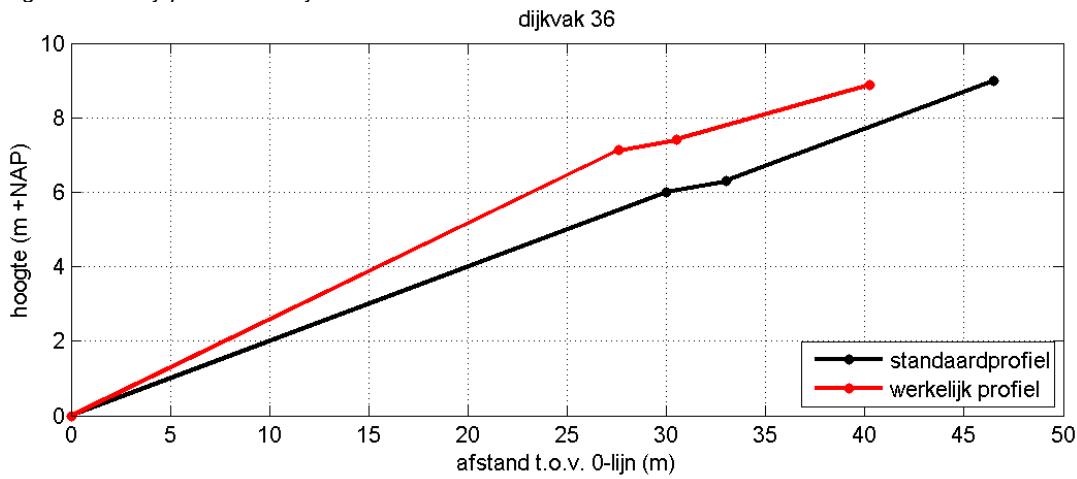
Figuur A.13: Dijkprofiel voor dijkvak 33, 't Schoor



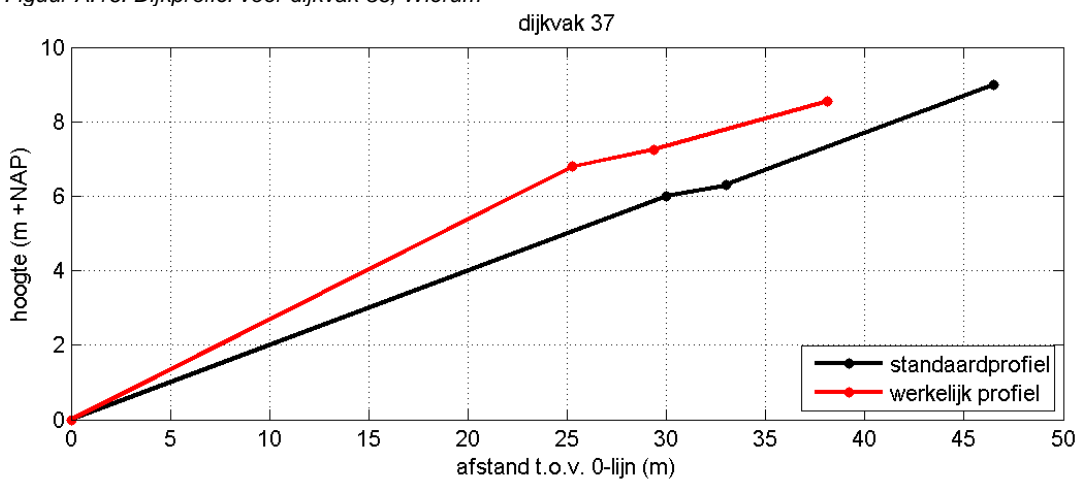
Figuur A.14: Dijkprofiel voor dijkvak 34



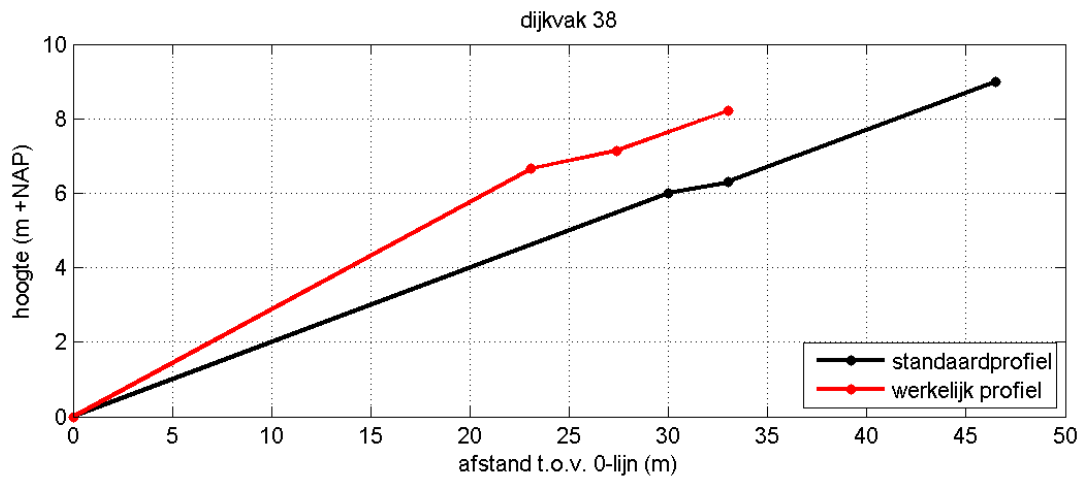
Figuur A.15: Dijkprofiel voor dijkvak 35



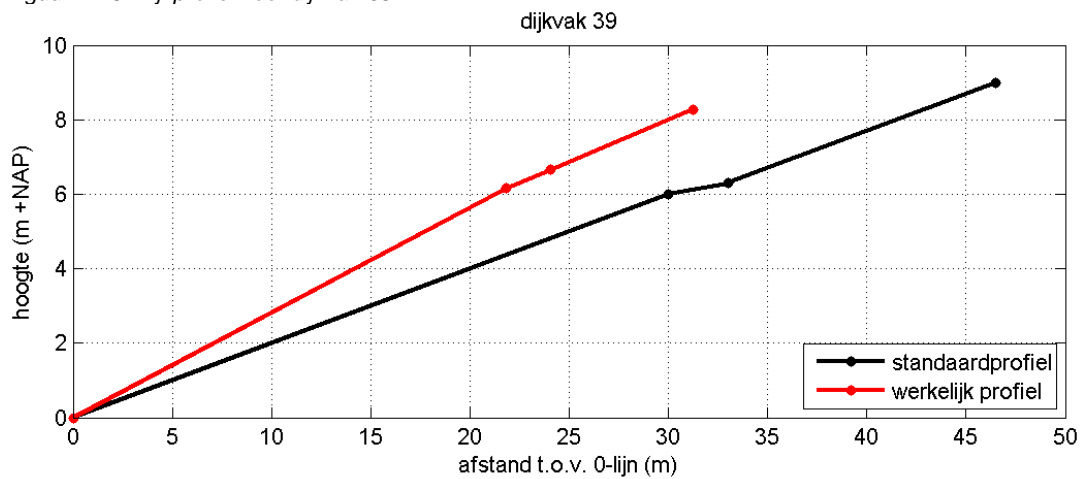
Figuur A.16: Dijkprofiel voor dijkvak 36, Wierum



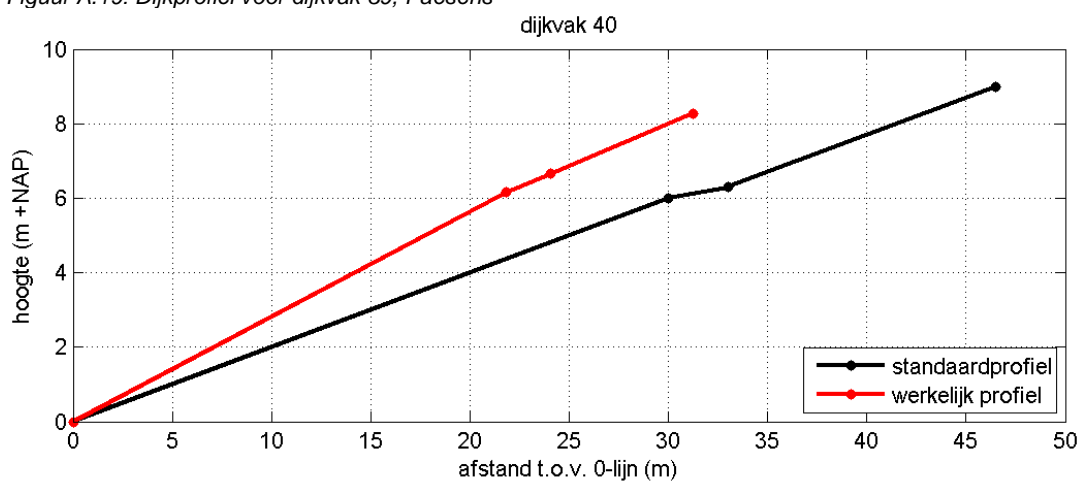
Figuur A.17: Dijkprofiel voor dijkvak 37



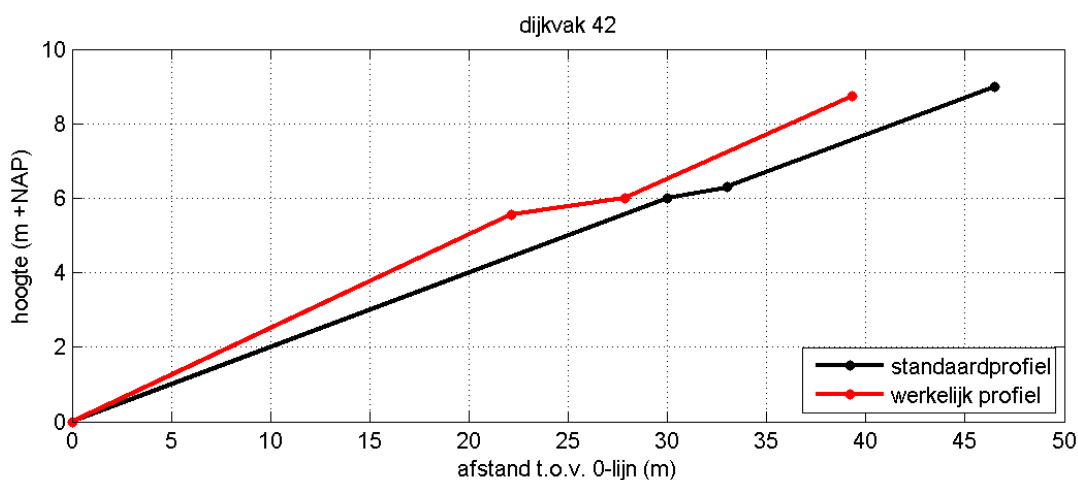
Figuur A.18: Dijkprofiel voor dijkvak 38



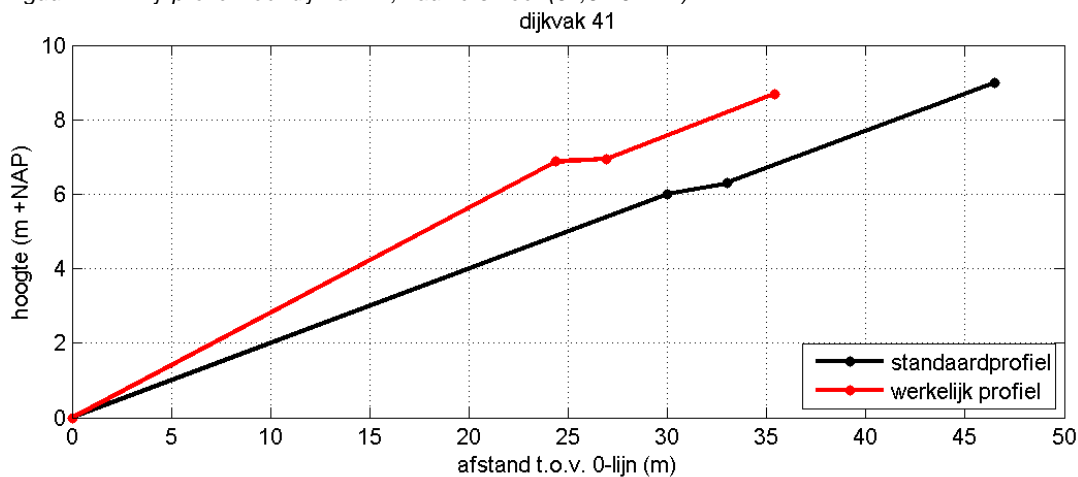
Figuur A.19: Dijkprofiel voor dijkvak 39, Paesens



Figuur A.20: Dijkprofiel voor dijkvak 40, Langgrousterwei



Figuur A.21: Dijkprofiel voor dijkvak 41, Lauwersmeer (57,5 - 61 km)



Figuur A.22: Dijkprofiel voor dijkvak 42, Lauwersmeer (61 - 61,8 km)

B Tabellen randvoorwaarden bij lage waterstanden

Ameland

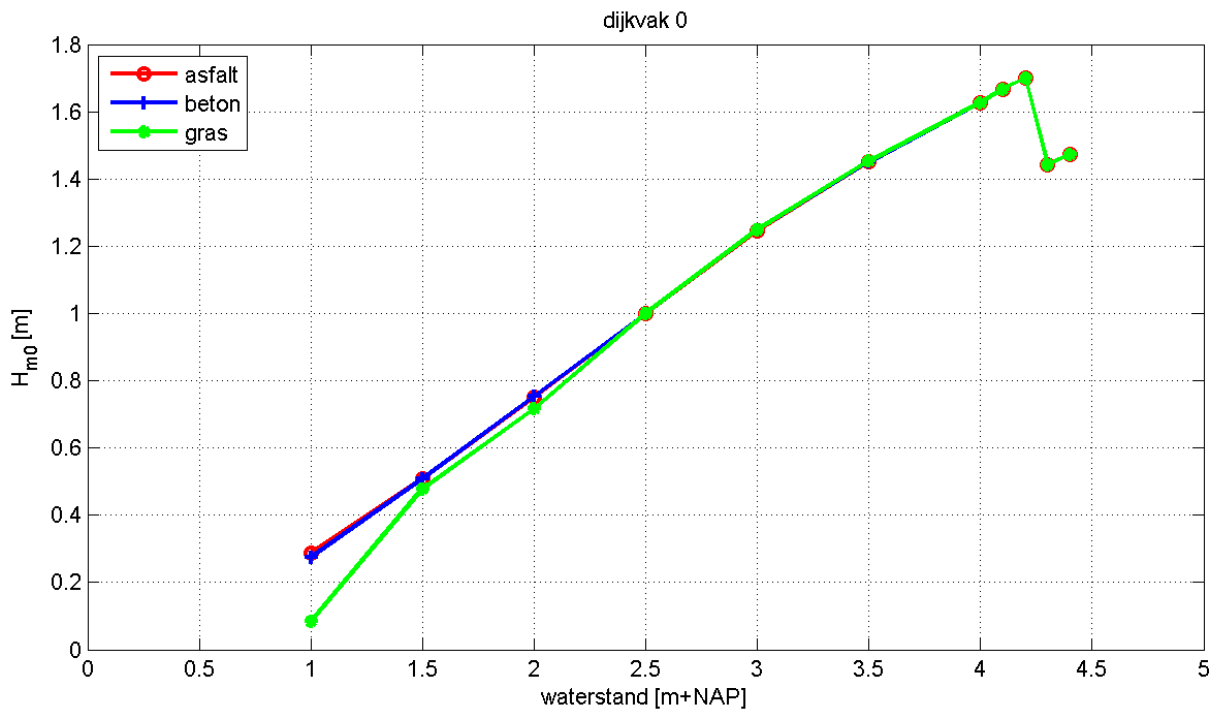
In de onderstaande tabel zijn voor de dijkvakken 0-6 op Ameland de golfhoogte H_{m0} , de piekperiode T_{pm} , de gemiddelde periode $T_{m-1,0}$ en de golfrichting Dir gegeven. De golfcondities zijn gegeven voor verschillende waterstanden en drie verschillende bekledingstypes. Daarnaast is voor elk dijkvak een figuur gegeven van de golfhoogte in relatie tot de waterstand, zie figuren B.1 tot en met B.8 en voor de golfperiode in relatie tot de waterstand, zie figuren B.9 tot en met B.16.

dijkvak 0												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]
0	0,76	3,89	3,30	205	0,78	4,02	3,40	213	0,75	4,45	3,50	236
0,5	0,76	3,89	3,30	205	0,78	4,02	3,40	213	0,75	4,45	3,50	236
1	0,76	3,89	3,30	205	0,78	4,02	3,40	213	0,75	4,45	3,50	236
1,5	0,76	3,89	3,30	205	0,78	4,02	3,40	213	0,75	4,45	3,50	236
2	0,76	3,89	3,30	205	0,78	4,02	3,40	213	0,75	4,45	3,50	236
2,5	1,00	4,52	3,81	221	1,00	4,52	3,81	221	1,02	4,54	3,86	227
3	1,25	4,95	4,22	222	1,25	4,95	4,22	223	1,26	4,95	4,25	226
3,5	1,45	5,18	4,46	228	1,45	5,18	4,46	228	1,47	5,18	4,48	228
4	1,55	5,36	4,63	236	1,55	5,36	4,63	236	1,64	5,38	4,70	237
4,5	1,55	5,36	4,63	236	1,55	5,36	4,63	236	1,67	5,43	4,75	238
dijkvak 1												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]
0	0,77	3,21	2,99	182	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
0,5	0,77	3,21	2,99	182	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
1	0,77	3,21	2,99	182	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
1,5	0,77	3,21	2,99	182	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
2	0,77	3,21	2,99	182	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
2,5	0,96	3,81	3,57	216	0,96	3,81	3,57	216	0,85	4,45	3,69	224
3	1,14	4,38	4,08	217	1,07	4,76	4,08	221	1,09	4,88	4,09	225
3,5	1,29	5,13	4,36	227	1,29	5,13	4,36	227	1,29	5,13	4,36	227
4	1,47	5,38	4,65	235	1,47	5,38	4,65	235	1,47	5,38	4,65	235
4,5	1,47	5,38	4,65	235	1,47	5,38	4,65	235	1,51	5,43	4,71	236

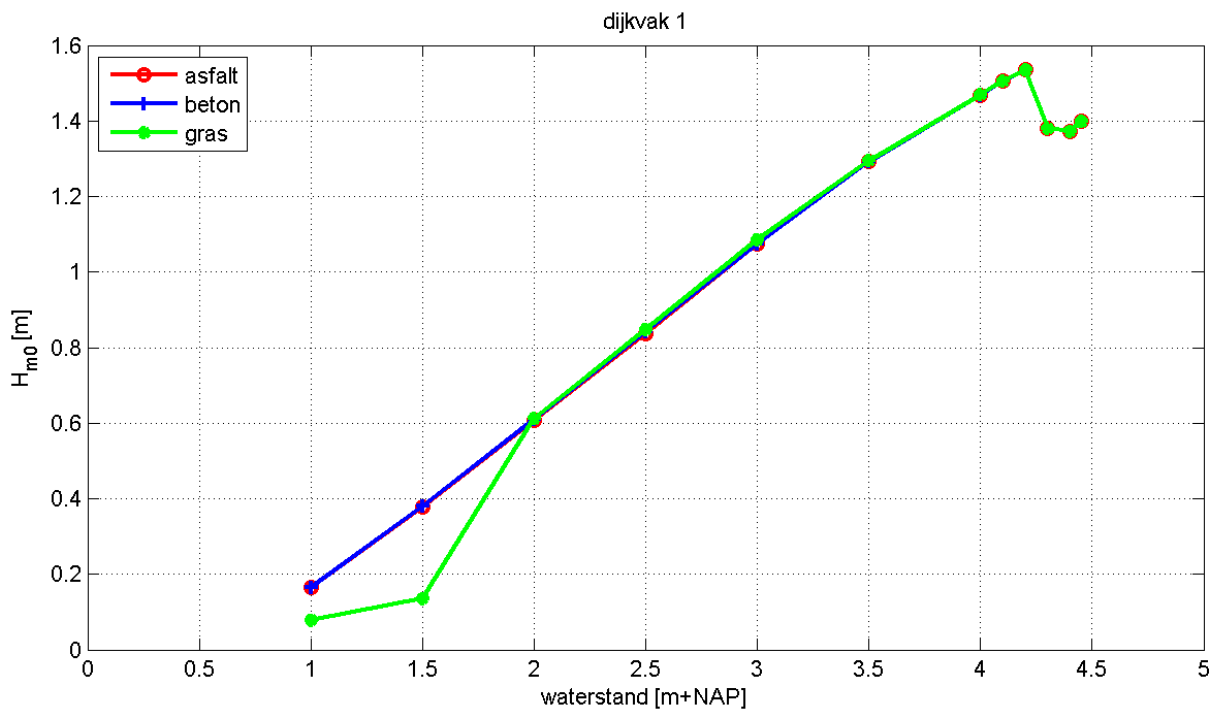
dijkvak 2												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,39	2,20	2,12	182	0,38	2,20	2,12	182	0,41	2,49	2,21	235
0,5	0,39	2,20	2,12	182	0,38	2,20	2,12	182	0,41	2,49	2,21	235
1	0,39	2,20	2,12	182	0,38	2,20	2,12	182	0,41	2,49	2,21	235
1,5	0,54	2,54	2,35	175	0,53	2,55	2,35	174	0,58	2,97	2,66	234
2	0,72	3,09	2,83	174	0,72	3,09	2,83	174	0,78	3,33	3,14	218
2,5	0,90	3,72	3,45	210	0,89	3,72	3,45	209	0,95	3,87	3,63	217
3	1,07	4,32	4,00	209	1,07	4,32	4,00	209	1,12	4,41	4,13	216
3,5	1,20	4,73	4,37	215	1,20	4,73	4,37	215	1,24	4,79	4,48	222
4	1,32	5,08	4,49	223	1,28	5,06	4,50	222	1,38	5,11	4,53	232
4,5	1,32	5,08	4,49	223	1,28	5,06	4,50	222	1,41	5,18	4,56	233
dijkvak 3a												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,44	2,57	2,32	170	0,43	2,57	2,32	169	0,44	2,57	2,32	171
0,5	0,44	2,57	2,32	170	0,43	2,57	2,32	169	0,44	2,57	2,32	171
1	0,44	2,57	2,32	170	0,43	2,57	2,32	169	0,44	2,57	2,32	171
1,5	0,62	3,00	2,71	169	0,62	3,00	2,71	169	0,63	3,00	2,71	172
2	0,81	3,44	3,11	168	0,80	3,44	3,11	168	0,82	3,45	3,12	173
2,5	0,90	3,73	3,46	209	0,89	3,74	3,47	209	0,95	4,03	3,74	200
3	1,08	4,33	4,01	209	1,07	4,33	4,01	209	1,12	4,59	4,25	198
3,5	1,20	4,74	4,38	215	1,20	4,74	4,38	215	1,22	4,96	4,53	202
4	1,32	5,08	4,50	223	1,32	5,08	4,50	223	1,33	5,11	4,49	222
4,5	1,32	5,08	4,50	223	1,32	5,08	4,50	223	1,36	5,16	4,50	223
dijkvak 3b												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,54	2,71	2,46	183	0,54	2,71	2,46	183	0,55	2,73	2,49	200
0,5	0,54	2,71	2,46	183	0,54	2,71	2,46	183	0,55	2,73	2,49	200
1	0,54	2,71	2,46	183	0,54	2,71	2,46	183	0,55	2,73	2,49	200
1,5	0,71	3,08	2,78	182	0,71	3,08	2,78	183	0,72	3,13	2,85	198
2	0,87	3,45	3,11	182	0,87	3,46	3,11	182	0,89	3,52	3,20	196
2,5	1,04	3,92	3,56	197	1,04	3,92	3,56	197	1,04	3,92	3,56	197
3	1,16	4,31	3,88	202	1,16	4,31	3,87	202	1,16	4,31	3,88	202
3,5	1,28	4,63	4,10	204	1,28	4,63	4,10	204	1,28	4,63	4,10	204
4	1,26	5,20	4,34	208	1,26	5,20	4,33	208	1,26	5,20	4,34	208
4,5	1,26	5,20	4,34	208	1,26	5,20	4,33	208	1,27	5,30	4,40	209

dijkvak 4												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,56	2,80	2,55	206	0,54	2,80	2,54	187	0,56	2,78	2,54	209
0,5	0,56	2,80	2,55	206	0,54	2,80	2,54	187	0,56	2,78	2,54	209
1	0,56	2,80	2,55	206	0,54	2,80	2,54	187	0,56	2,78	2,54	209
1,5	0,74	3,18	2,89	203	0,71	3,18	2,89	190	0,74	3,17	2,88	207
2	0,91	3,56	3,24	202	0,91	3,56	3,24	202	0,92	3,58	3,23	209
2,5	1,06	3,90	3,54	206	1,05	3,91	3,54	205	1,10	3,97	3,60	209
3	1,25	4,34	3,97	213	1,25	4,34	3,97	213	1,27	4,38	3,99	217
3,5	1,37	4,61	4,21	216	1,37	4,61	4,21	216	1,39	4,59	4,18	223
4	1,37	4,94	4,40	223	1,37	4,94	4,40	223	1,38	5,06	4,42	219
4,5	1,38	5,02	4,45	224	1,38	5,02	4,45	224	1,39	5,13	4,45	219
dijkvak 5												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,55	2,80	2,61	212	0,55	2,80	2,62	211	0,56	2,80	2,60	215
0,5	0,55	2,80	2,61	212	0,55	2,80	2,62	211	0,56	2,80	2,60	215
1	0,55	2,80	2,61	212	0,55	2,80	2,62	211	0,56	2,80	2,60	215
1,5	0,73	3,21	2,98	209	0,73	3,21	2,98	209	0,74	3,21	2,97	212
2	0,91	3,62	3,34	208	0,91	3,62	3,34	207	0,92	3,62	3,29	207
2,5	1,07	3,99	3,64	221	1,07	3,99	3,64	221	1,09	4,09	3,70	217
3	1,26	4,44	4,06	220	1,20	4,39	3,95	222	1,29	4,53	4,10	217
3,5	1,35	4,60	4,17	225	1,35	4,60	4,17	225	1,40	4,79	4,35	223
4	1,44	4,80	4,35	231	1,44	4,80	4,35	231	1,51	5,06	4,54	231
4,5	1,46	4,85	4,39	232	1,46	4,85	4,39	232	1,46	5,03	4,50	235
dijkvak 6												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,53	2,80	2,58	183	0,53	2,87	2,58	182	0,55	2,87	2,60	186
0,5	0,53	2,80	2,58	183	0,53	2,87	2,58	182	0,55	2,87	2,60	186
1	0,53	2,80	2,58	183	0,53	2,87	2,58	182	0,55	2,87	2,60	186
1,5	0,70	3,21	2,89	185	0,70	3,21	2,89	184	0,75	3,18	2,89	198
2	0,91	3,60	3,24	196	0,91	3,60	3,24	196	0,92	3,65	3,35	216
2,5	1,07	4,09	3,71	213	1,07	4,09	3,71	213	1,09	4,10	3,75	215
3	1,25	4,53	4,12	213	1,25	4,53	4,12	213	1,27	4,54	4,15	215
3,5	1,35	4,79	4,32	220	1,35	4,79	4,32	220	1,37	4,79	4,35	220
4	1,43	5,01	4,39	228	1,43	5,01	4,39	228	1,46	5,07	4,53	228
4,5	1,43	5,01	4,39	228	1,06	5,59	4,12	239	1,46	5,07	4,53	228

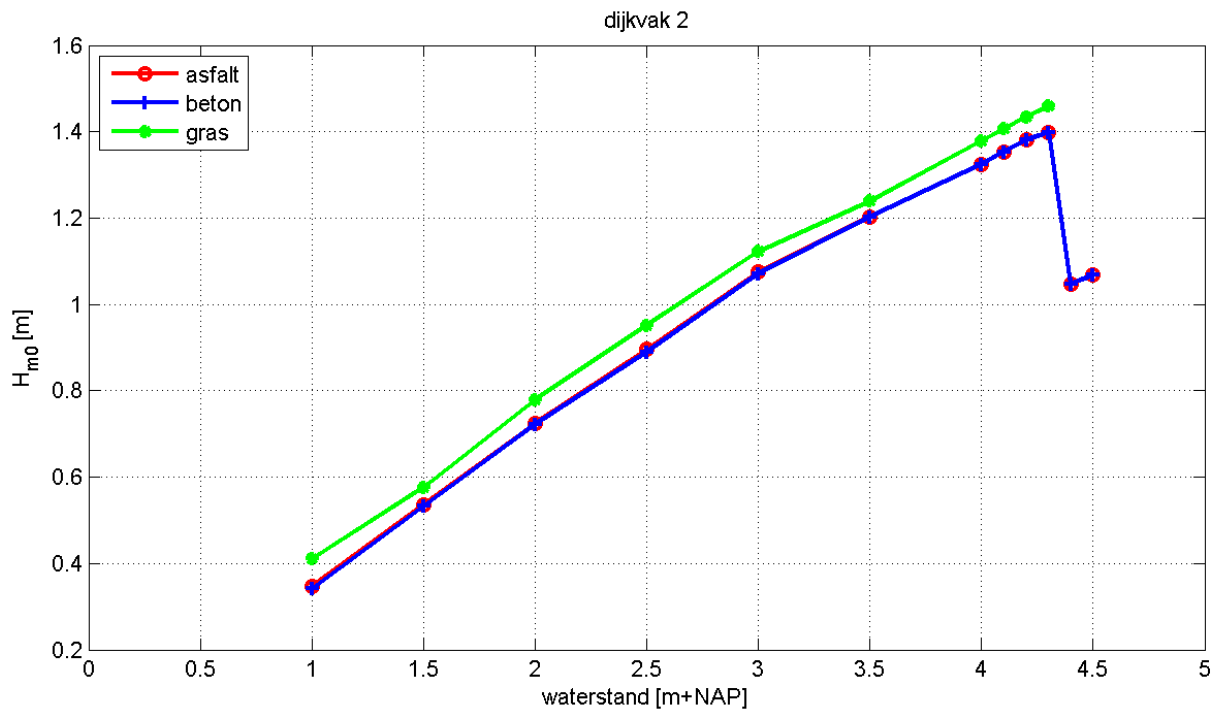
Tabel B.9.1: Randvoorwaarden voor Ameland bij faalmechanisme instabiliteit van de bekleding



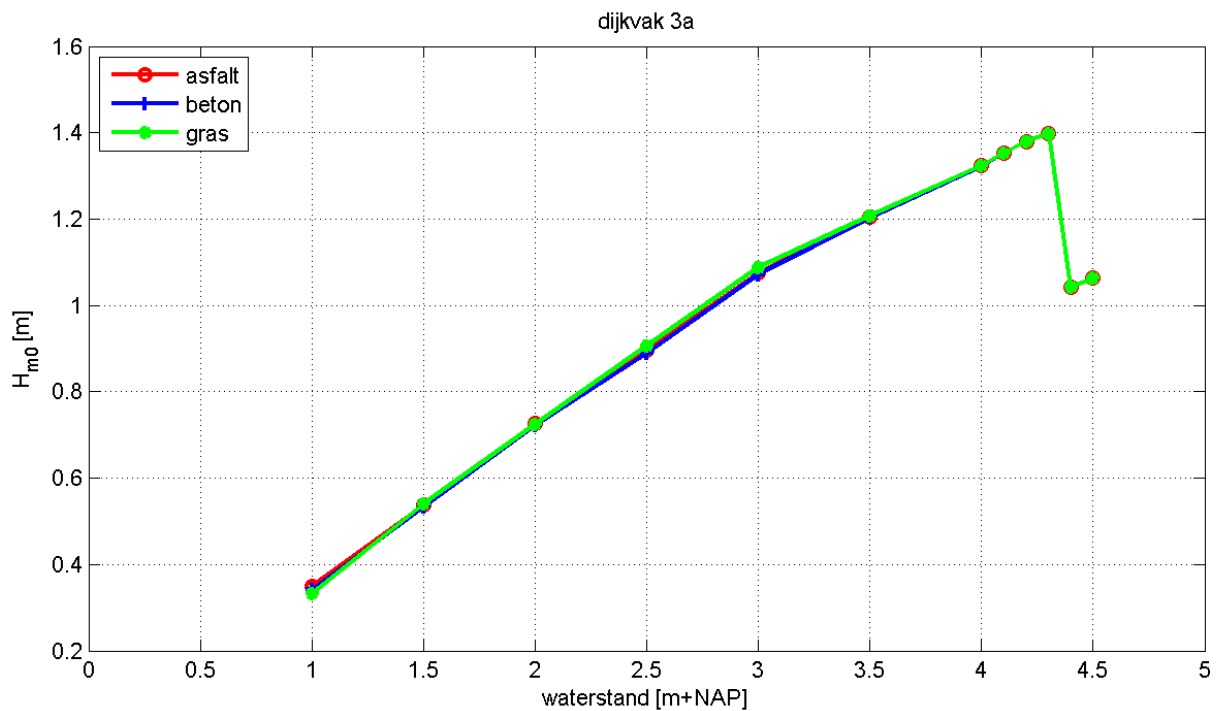
Figuur B.1: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 0



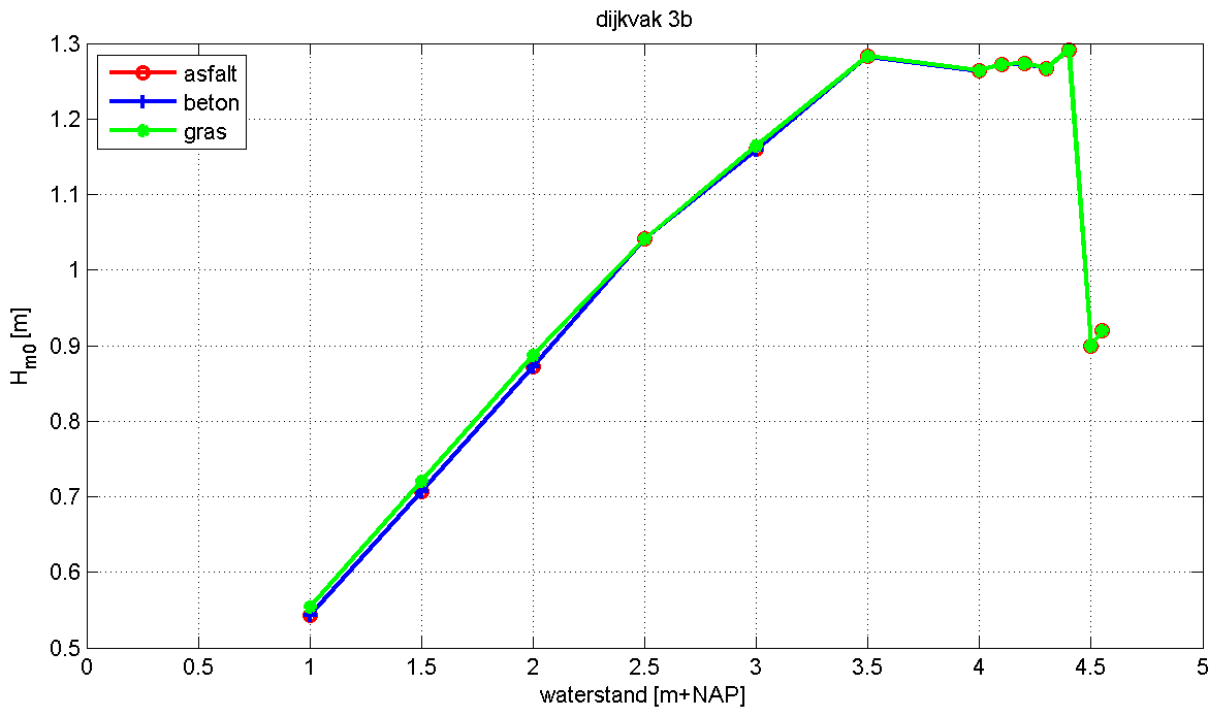
Figuur B.2: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 1



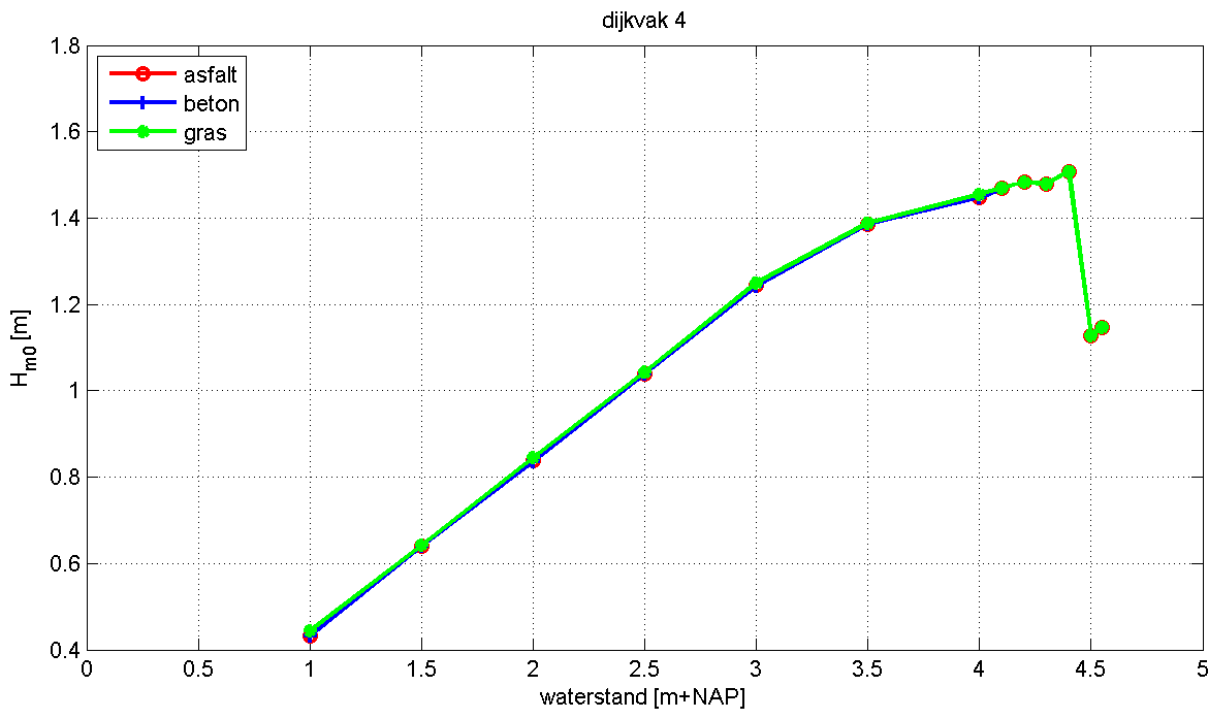
Figuur B.3: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 2



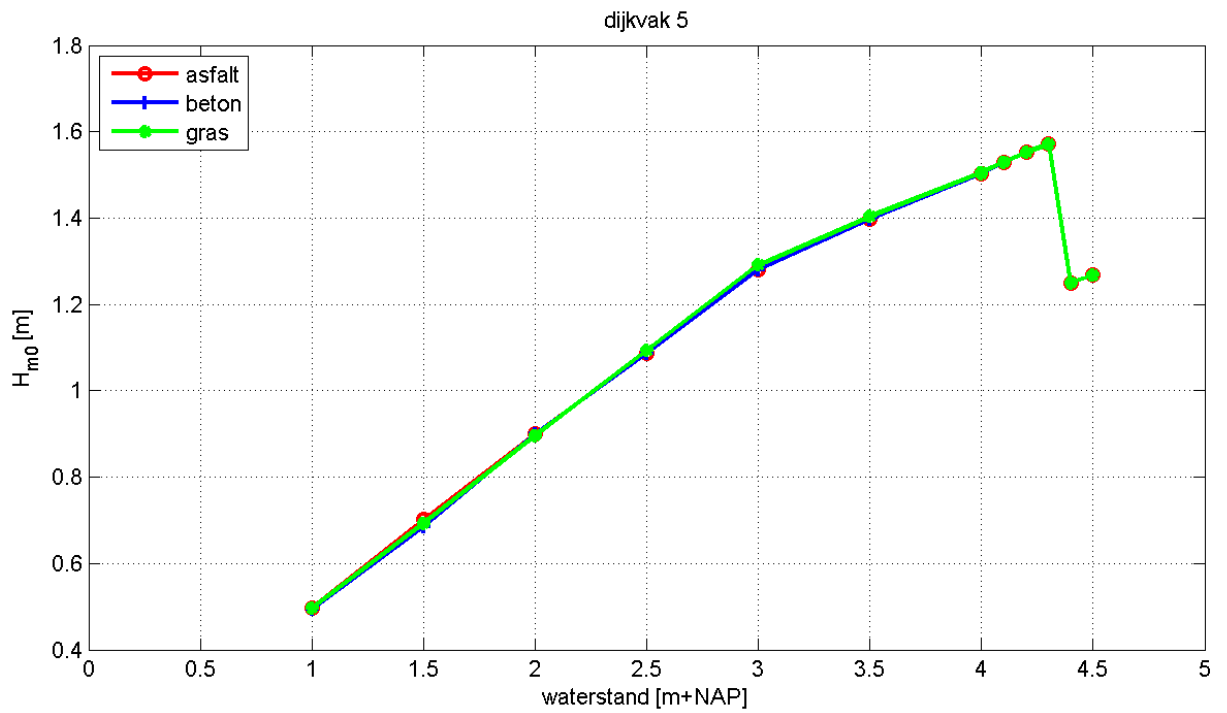
Figuur B.4: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 3a



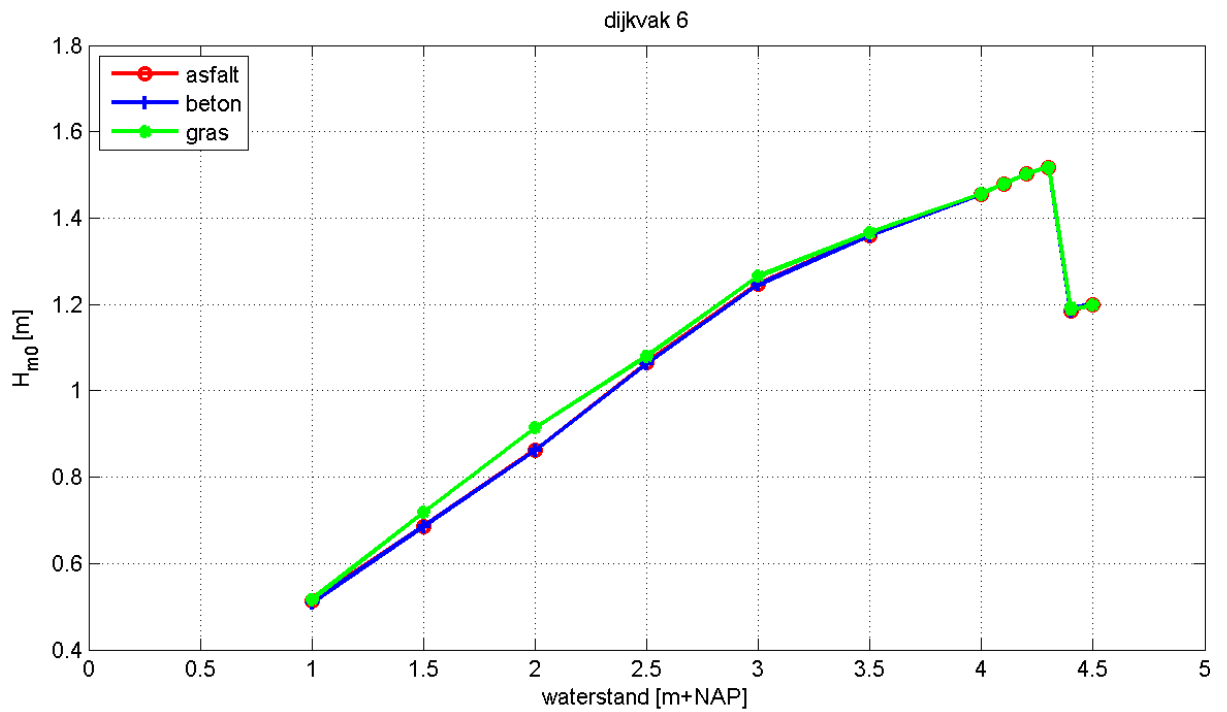
Figuur B.5: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 3b



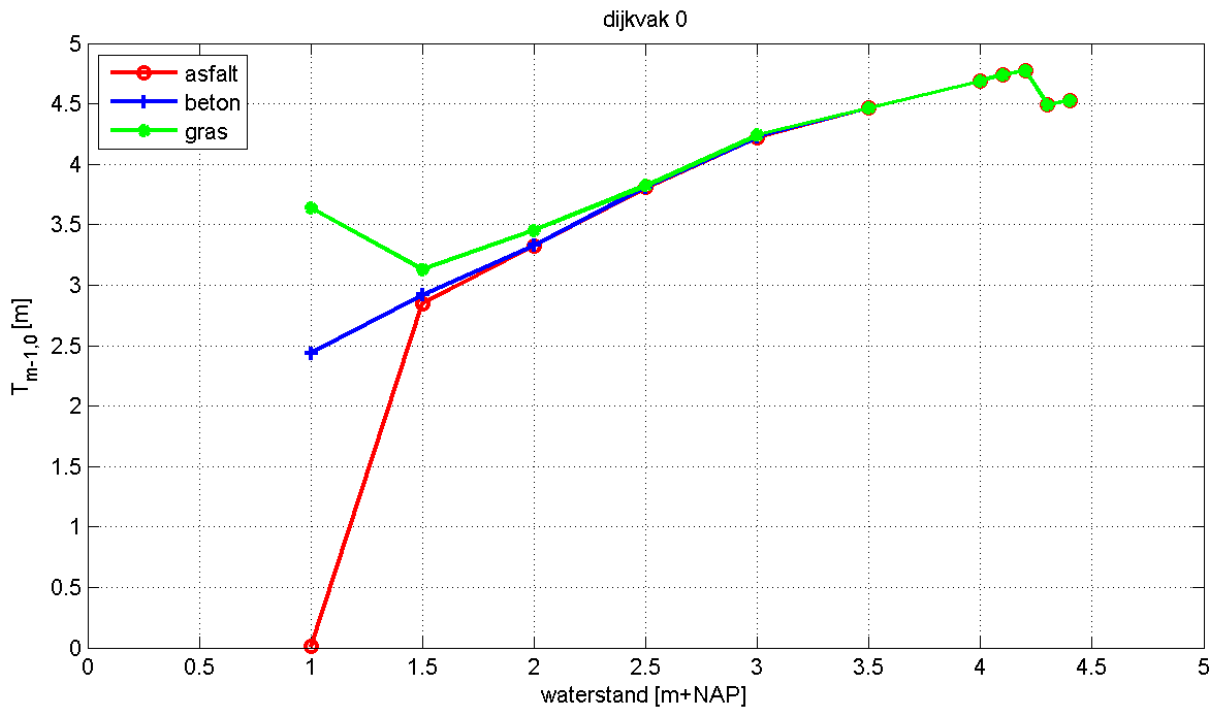
Figuur B.6: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 4



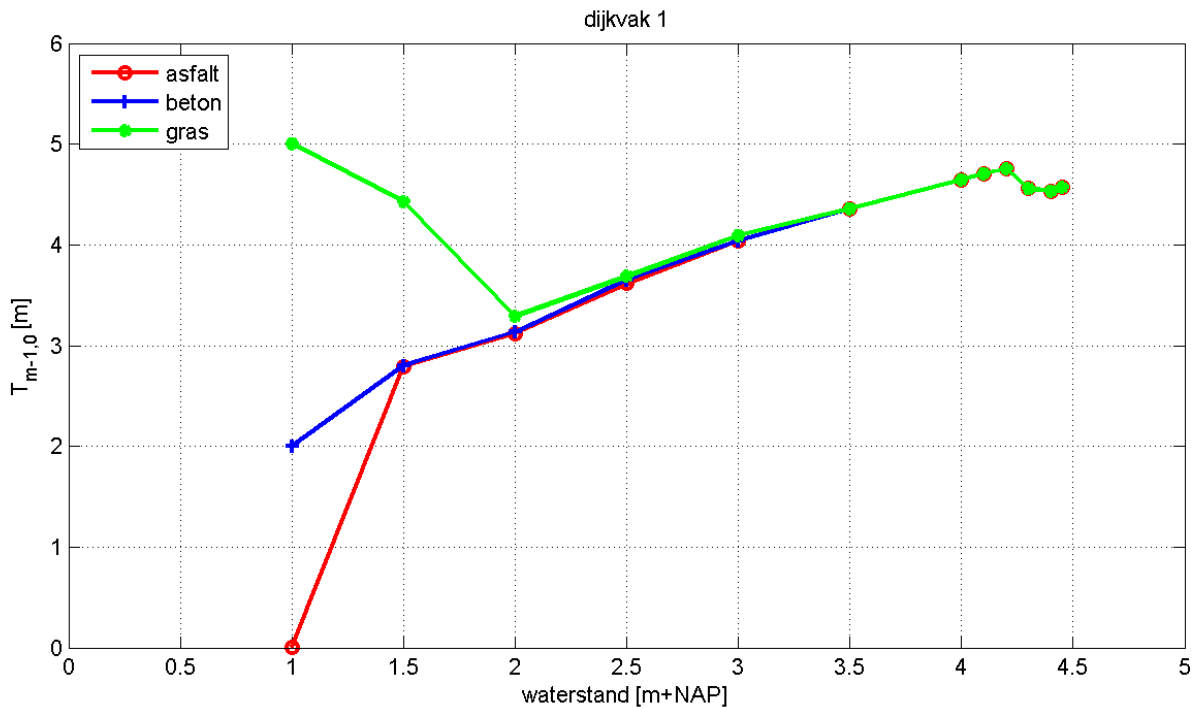
Figuur B.7: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 5



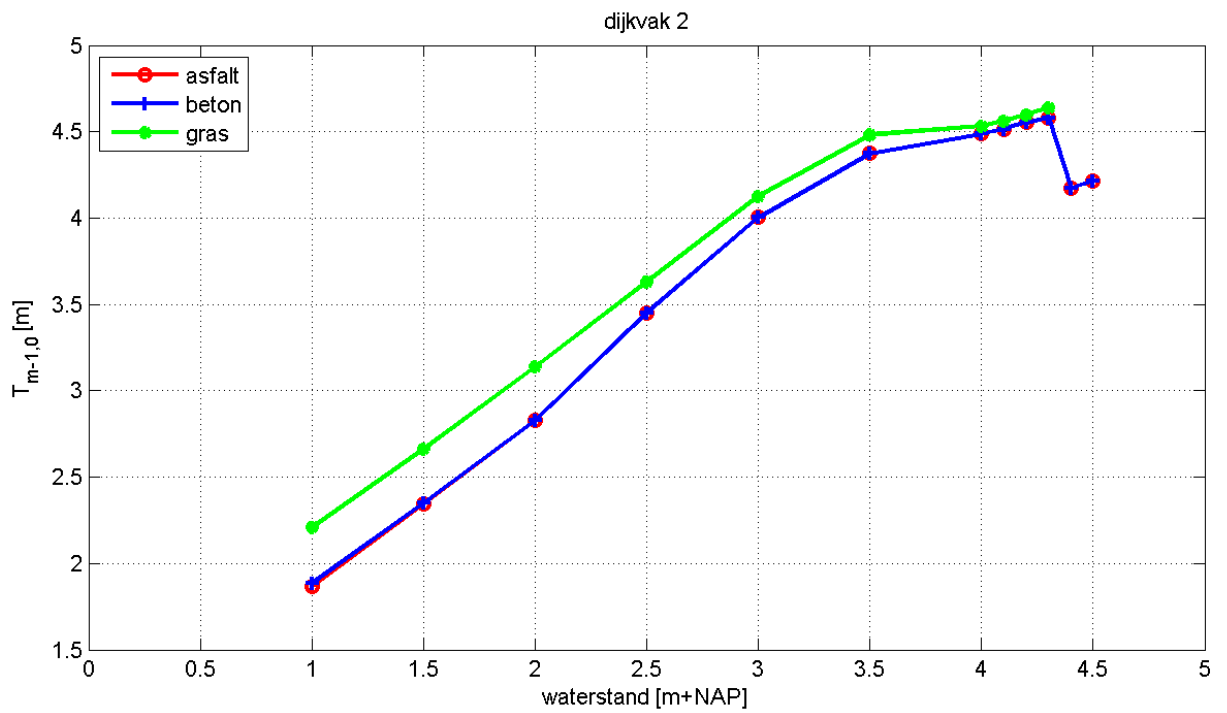
Figuur B.8: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 6



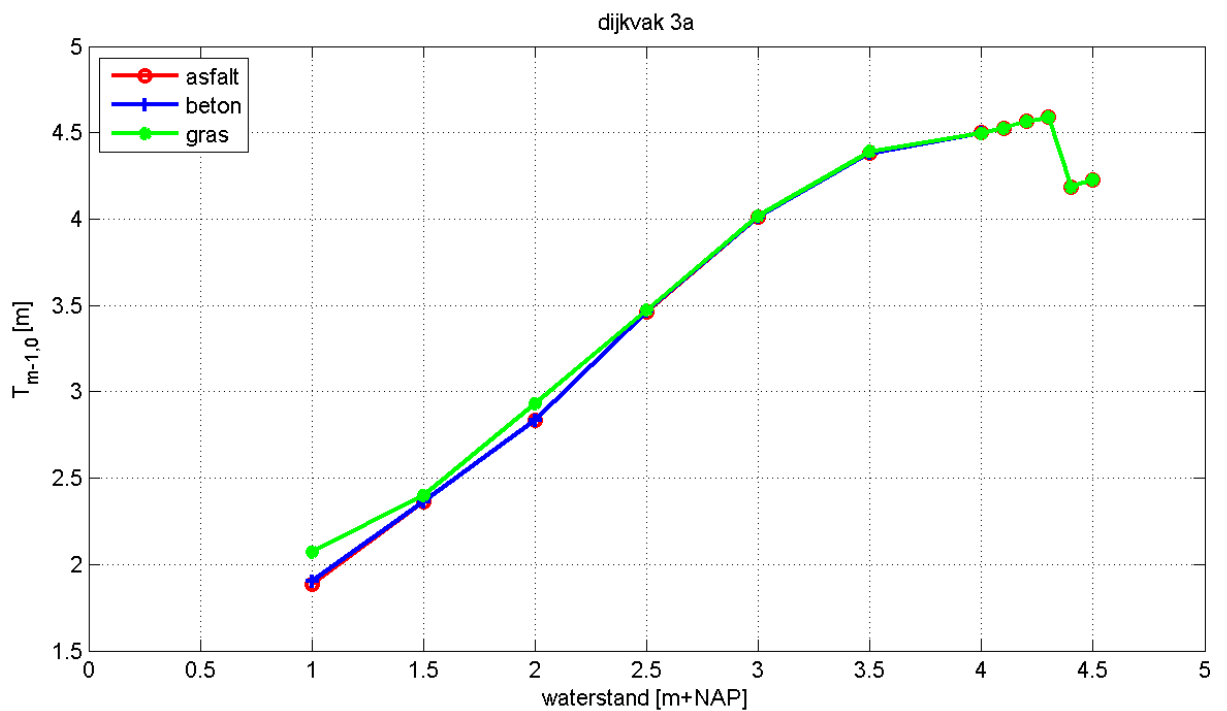
Figuur B.9: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 0



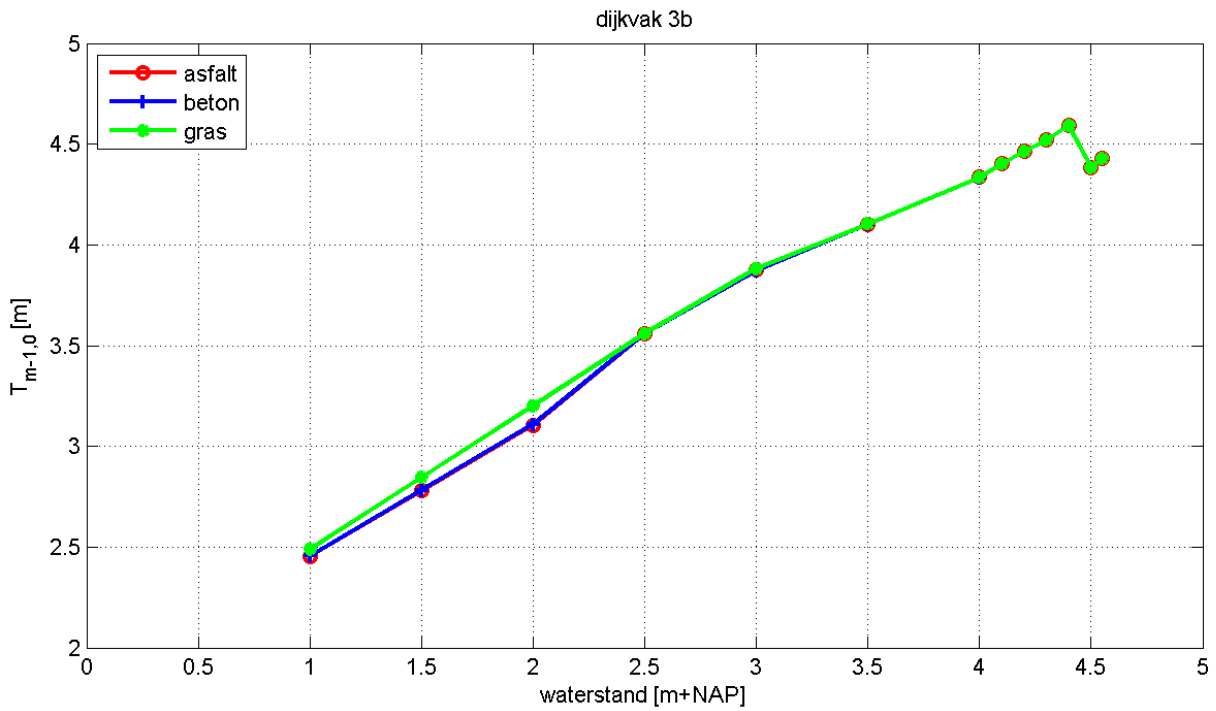
Figuur B.10: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 1



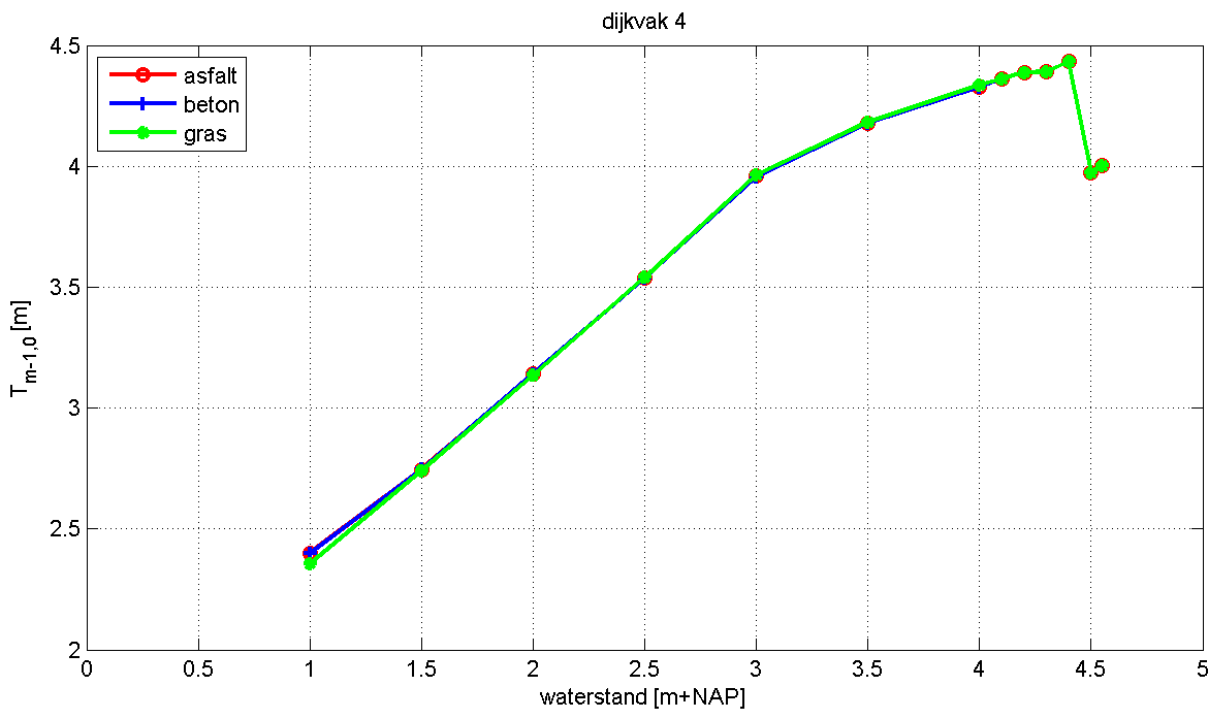
Figuur B.11: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 2



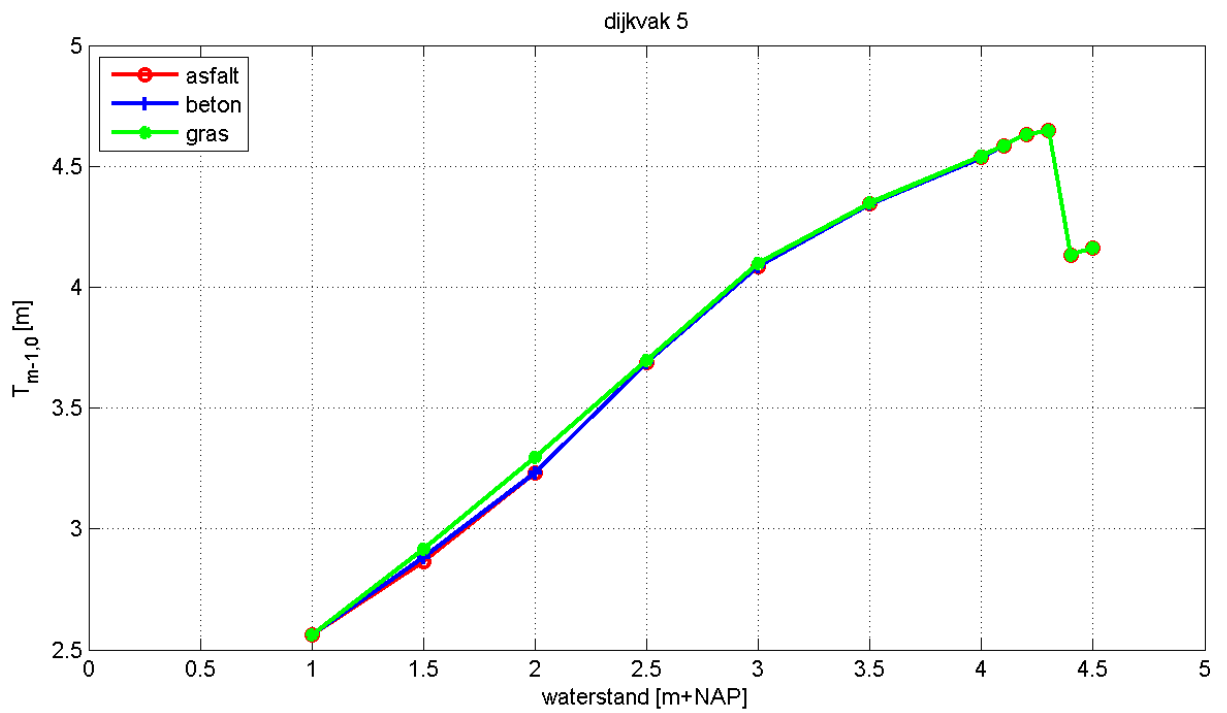
Figuur B.12: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 3a



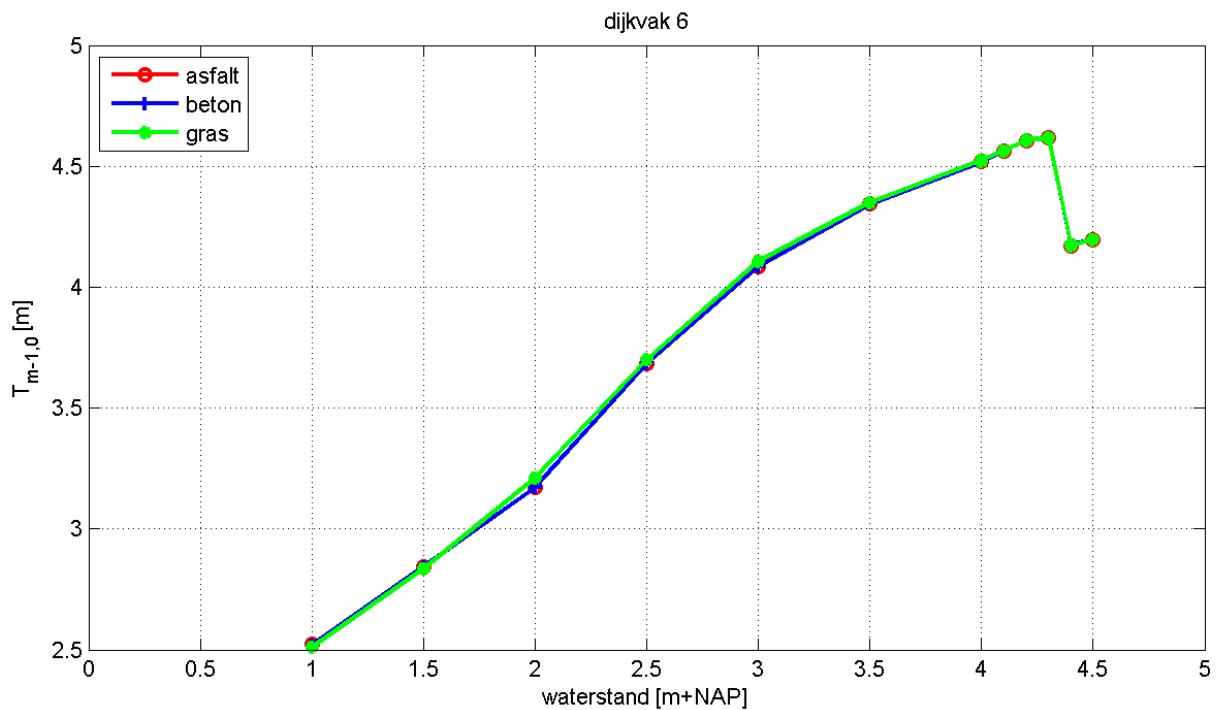
Figuur B.13: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 3b



Figuur B.14: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 4



Figuur B.15: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 5



Figuur B.16: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 6

Friese kust

In de onderstaande tabel zijn voor de dijkvakken 23, 24, 31-42 langs de Friese kust de golfhoogte H_{m0} , de piekperiode T_{pm} , de gemiddelde periode $T_{m-1,0}$ en de golfrichting Dir gegeven. De golfcondities zijn gegeven voor verschillende waterstanden en drie verschillende bekledingstypes. Daarnaast is voor elk dijkvak een figuur gegeven van de golfhoogte in relatie tot de waterstand, zie figuren B.17 tot en met B.30. En de relatie van de golfperiode tot de waterstand in figuren B.31 tot en met B.44.

dijkvak 23												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]
0	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
0,5	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
1	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
1,5	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
2	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
2,5	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
3	0,73	3,83	3,37	340	0,69	4,54	3,41	343	0,68	4,65	3,42	346
3,5	0,94	4,54	3,76	340	0,92	4,72	3,80	341	0,89	5,14	3,86	347
4	1,15	5,25	4,16	339	1,14	5,38	4,18	340	1,00	5,70	4,12	342
4,5	1,37	5,89	4,54	334	1,37	5,89	4,54	334	1,19	6,44	4,61	335

dijkvak 24												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]	H_{m0} [m]	T_{pm} [s]	$T_{m-1,0}$ [m]	Dir [°N]
0	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
0,5	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
1	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
1,5	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
2	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
2,5	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
3	0,62	3,32	3,09	340	0,60	3,80	2,99	344	0,59	3,94	3,02	336
3,5	0,82	4,01	3,49	339	0,81	4,11	3,49	341	0,79	4,45	3,52	337
4	1,02	4,72	3,89	338	1,01	4,85	3,92	341	0,98	5,21	3,96	331
4,5	1,22	5,39	4,30	335	1,22	5,44	4,30	334	1,15	6,07	4,45	331

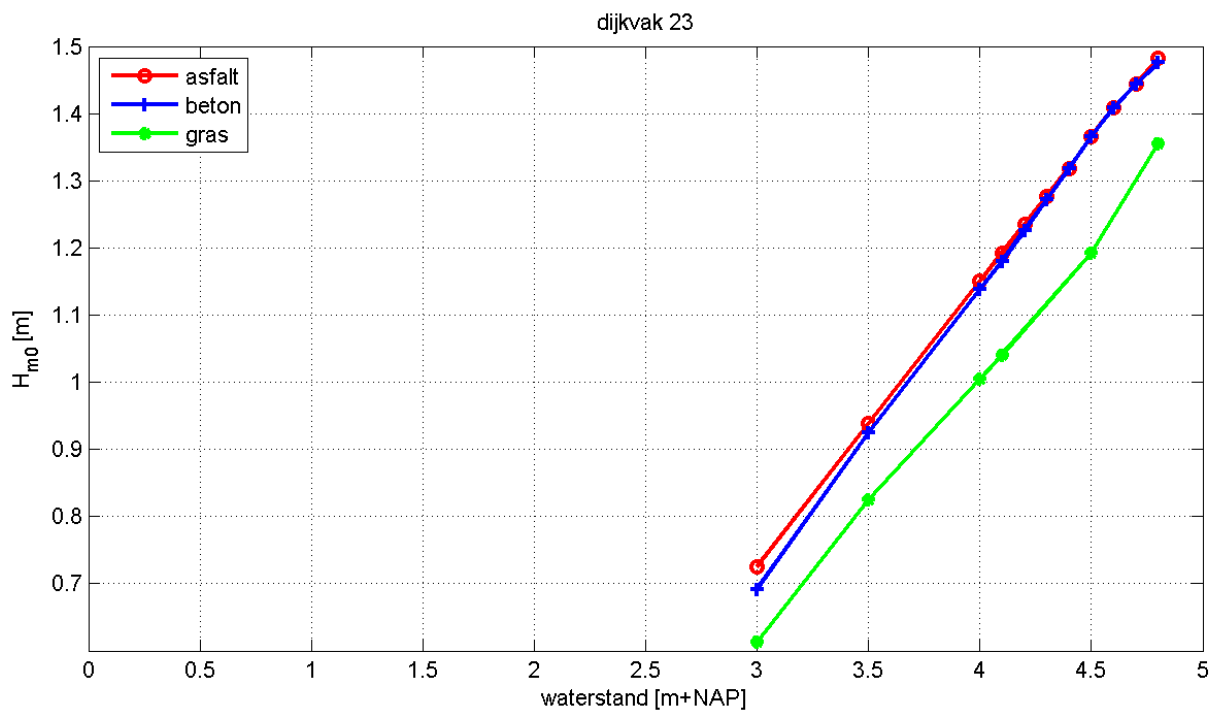
dijkvak 31												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
0,5	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
1	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
1,5	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
2	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
2,5	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
3	0,73	3,39	2,97	324	0,72	3,54	3,05	333	0,70	3,62	3,14	342
3,5	0,92	3,98	3,32	322	0,90	4,18	3,42	335	0,89	4,26	3,46	342
4	1,12	4,57	3,68	320	1,08	4,84	3,76	336	1,07	4,94	3,80	347
4,5	1,31	5,13	4,03	317	1,25	5,49	4,08	335	1,25	5,56	4,10	340
dijkvak 32												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
0,5	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
1	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
1,5	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
2	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
2,5	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
3	1,05	4,74	3,70	342	1,04	4,74	3,70	343	1,02	5,06	3,76	341
3,5	1,21	5,79	4,14	343	1,21	5,79	4,15	344	1,18	6,17	4,28	342
4	1,37	6,84	4,59	345	1,37	6,84	4,59	346	1,34	7,31	4,79	344
4,5	1,53	7,84	5,00	346	1,53	7,82	5,00	346	1,50	8,35	5,27	344
dijkvak 33												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
0,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
1	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
1,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
2	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
2,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
3	1,10	5,66	3,85	339	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
3,5	1,28	6,78	4,41	340	1,27	6,94	4,53	342	1,25	7,11	4,60	345
4	1,46	7,90	4,96	341	1,46	7,93	4,99	342	1,43	8,16	5,19	346
4,5	1,63	8,99	5,50	341	1,63	8,98	5,51	341	1,23	12,69	5,72	349

dijkvak 34												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
0,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
1	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
1,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
2	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
2,5	0,90	4,85	3,41	341	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
3	1,10	5,66	3,85	339	1,10	5,79	3,92	341	1,00	6,77	4,22	357
3,5	1,28	6,78	4,41	340	1,27	6,94	4,53	342	1,25	7,11	4,60	345
4	1,46	7,90	4,96	341	1,46	7,93	4,99	342	1,43	8,16	5,19	346
4,5	1,63	8,99	5,50	341	1,63	8,98	5,51	341	1,23	12,69	5,72	349
dijkvak 35												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,30	2,07	1,89	340	0,30	2,08	1,90	341	0,30	2,16	1,97	355
0,5	0,30	2,07	1,89	340	0,30	2,08	1,90	341	0,30	2,16	1,97	355
1	0,30	2,07	1,89	340	0,30	2,08	1,90	341	0,30	2,16	1,97	355
1,5	0,50	2,92	2,37	342	0,50	2,97	2,39	342	0,46	3,46	2,58	359
2	0,71	3,79	2,86	341	0,70	4,01	2,93	343	0,64	4,71	3,18	358
2,5	0,91	4,86	3,39	340	0,91	4,89	3,41	342	0,82	5,96	3,78	357
3	1,12	5,79	3,89	340	1,11	5,95	3,95	341	1,02	7,28	4,41	356
3,5	1,30	6,87	4,44	340	1,30	6,93	4,48	342	1,25	7,35	4,67	346
4	1,49	7,95	4,98	340	1,48	8,01	5,03	342	1,48	8,10	5,08	345
4,5	1,67	9,01	5,52	340	1,66	8,99	5,51	337	1,66	9,07	5,56	340
dijkvak 36												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
0,5	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
1	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
1,5	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
2	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
2,5	0,82	5,36	3,53	1	0,78	5,78	3,66	358	0,99	7,03	4,24	356
3	1,03	6,53	4,10	1	1,01	6,88	4,20	359	0,99	7,03	4,24	356
3,5	1,24	7,04	4,47	348	1,24	7,09	4,49	348	1,22	7,31	4,57	347
4	1,43	8,07	5,04	347	1,43	8,06	5,04	346	1,44	8,11	5,02	346
4,5	1,59	8,88	5,44	345	1,59	8,88	5,44	345	1,63	8,99	5,50	342

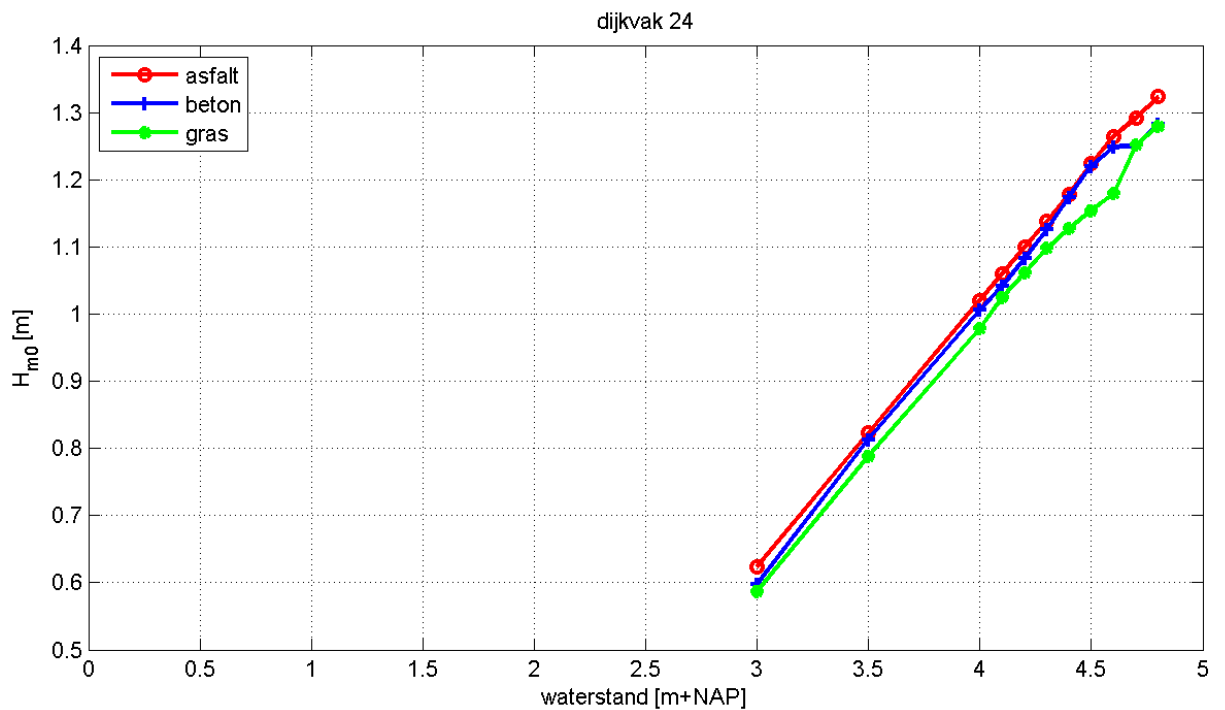
dijkvak 37												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
0,5	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
1	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
1,5	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
2	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
2,5	0,94	5,59	3,54	347	0,94	5,61	3,55	348	1,01	7,88	4,61	359
3	1,14	6,62	4,05	345	1,14	6,66	4,07	346	1,01	7,88	4,61	359
3,5	1,32	7,49	4,56	345	1,32	7,51	4,58	346	1,31	7,67	4,59	345
4	1,50	8,35	5,06	344	1,50	8,39	5,09	346	1,48	8,52	5,13	345
4,5	1,68	9,11	5,53	342	1,68	9,10	5,57	341	1,68	9,14	5,54	341
dijkvak 38												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,48	3,45	2,49	9	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
0,5	0,48	3,45	2,49	9	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
1	0,48	3,45	2,49	9	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
1,5	0,48	3,45	2,49	9	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
2	0,67	4,76	3,12	7	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
2,5	0,86	6,11	3,76	4	0,82	6,51	3,93	2	0,63	14,94	5,19	353
3	1,05	7,45	4,40	0	1,02	7,80	4,55	359	0,63	14,94	5,19	353
3,5	1,28	7,64	4,60	346	1,23	8,15	4,94	356	0,86	15,04	5,69	352
4	1,45	8,48	5,18	344	1,09	14,97	6,24	352	1,09	15,05	6,18	351
4,5	1,66	9,22	5,58	341	1,32	15,11	6,65	349	1,32	15,11	6,65	349
dijkvak 39												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
0,5	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
1	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
1,5	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
2	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
2,5	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
3	0,57	8,84	4,29	12	0,56	14,53	5,11	11	0,55	14,89	4,70	2
3,5	0,69	7,27	3,68	356	0,77	14,61	5,73	7	0,77	14,96	5,40	0
4	0,88	9,78	4,78	355	0,84	11,01	4,86	0	0,99	14,97	6,10	359
4,5	1,08	11,36	5,59	351	1,07	13,51	5,69	356	1,21	15,03	6,77	357

dijkvak 40												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
0,5	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
1	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
1,5	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
2	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
2,5	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
3	0,62	4,50	2,72	350	0,54	13,73	4,72	1	0,54	14,23	4,77	2
3,5	0,81	5,89	3,50	350	0,74	11,57	5,17	354	0,65	15,06	4,87	360
4	1,01	7,28	4,27	349	0,88	15,04	5,64	356	0,88	15,03	5,65	357
4,5	1,22	9,75	5,47	349	1,15	13,40	6,59	349	1,11	15,03	6,41	353
dijkvak 41												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	1,35	4,00	3,47	334	1,35	4,00	3,47	334	1,45	4,25	3,75	314
0,5	1,35	4,00	3,47	334	1,35	4,00	3,47	334	1,45	4,25	3,75	314
1	1,35	4,00	3,47	334	1,35	4,00	3,47	334	1,45	4,25	3,75	314
1,5	1,46	4,33	3,63	335	1,46	4,33	3,63	335	1,54	4,48	3,87	315
2	1,56	4,66	3,78	336	1,57	4,66	3,78	336	1,64	4,72	3,98	316
2,5	1,67	4,99	3,93	338	1,67	4,99	3,94	338	1,71	5,04	3,98	333
3	1,79	5,32	4,10	339	1,79	5,32	4,09	339	1,81	5,35	4,12	335
3,5	1,89	5,69	4,26	339	1,88	5,69	4,26	339	1,35	8,58	5,14	343
4	1,97	6,04	4,42	339	1,81	6,62	4,41	343	1,53	9,15	5,58	345
4,5	1,92	6,98	4,58	341	1,73	9,44	5,77	329	1,31	13,47	6,83	348
dijkvak 42												
h [m+NAP]	asfalt				beton zuilen				gras			
	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]	H _{m0} [m]	T _{pm} [s]	T _{m-1,0} [m]	Dir [°N]
0	1,37	4,00	3,49	333	1,37	4,00	3,49	333	1,48	4,28	3,78	312
0,5	1,37	4,00	3,49	333	1,37	4,00	3,49	333	1,48	4,28	3,78	312
1	1,37	4,00	3,49	333	1,37	4,00	3,49	333	1,48	4,28	3,78	312
1,5	1,48	4,32	3,64	335	1,48	4,32	3,64	335	1,57	4,49	3,90	313
2	1,59	4,65	3,80	336	1,59	4,64	3,80	336	1,67	4,71	4,01	314
2,5	1,70	4,96	3,95	337	1,70	4,97	3,95	338	1,76	4,96	4,13	316
3	1,81	5,29	4,11	339	1,82	5,29	4,11	339	1,83	5,31	4,14	334
3,5	1,91	5,65	4,27	339	1,91	5,65	4,28	339	1,93	5,68	4,29	335
4	1,98	5,99	4,42	339	1,98	5,98	4,42	339	2,03	6,04	4,45	336
4,5	2,08	6,34	4,59	335	2,08	6,34	4,59	335	2,12	6,38	4,61	334

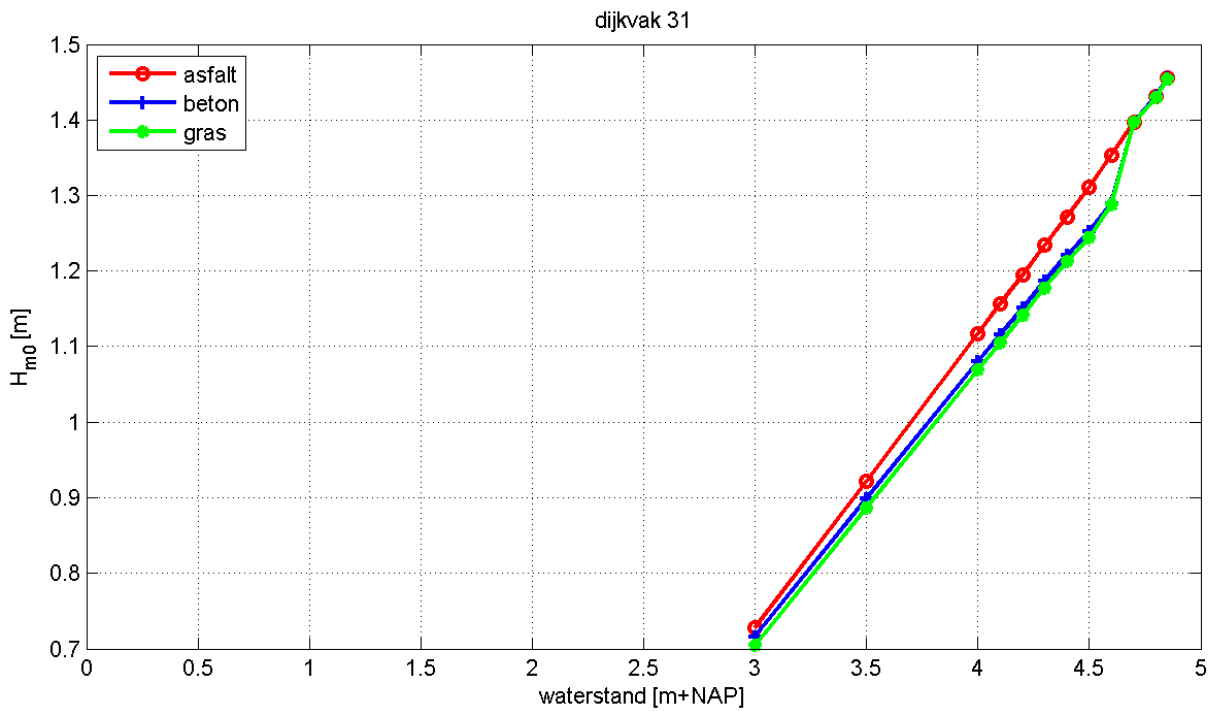
Tabel B.2: Randvoorwaarden voor de Friese kust bij faalmechanisme bekleding



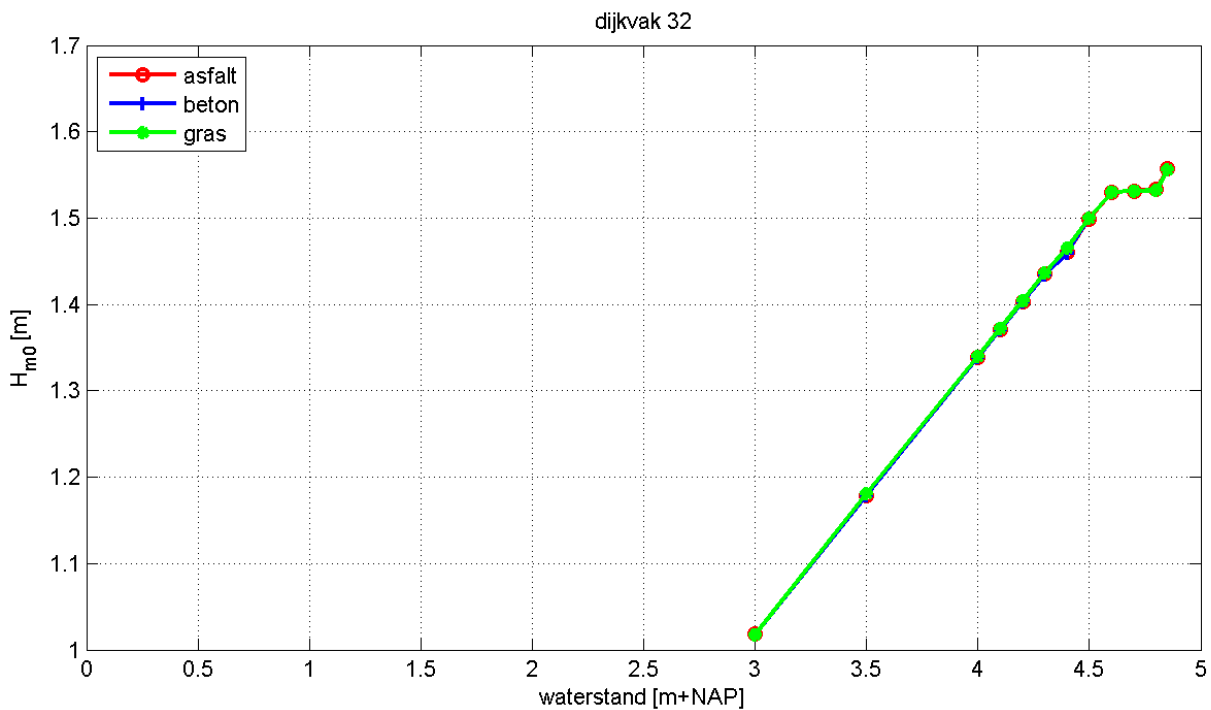
Figuur B.17: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 23



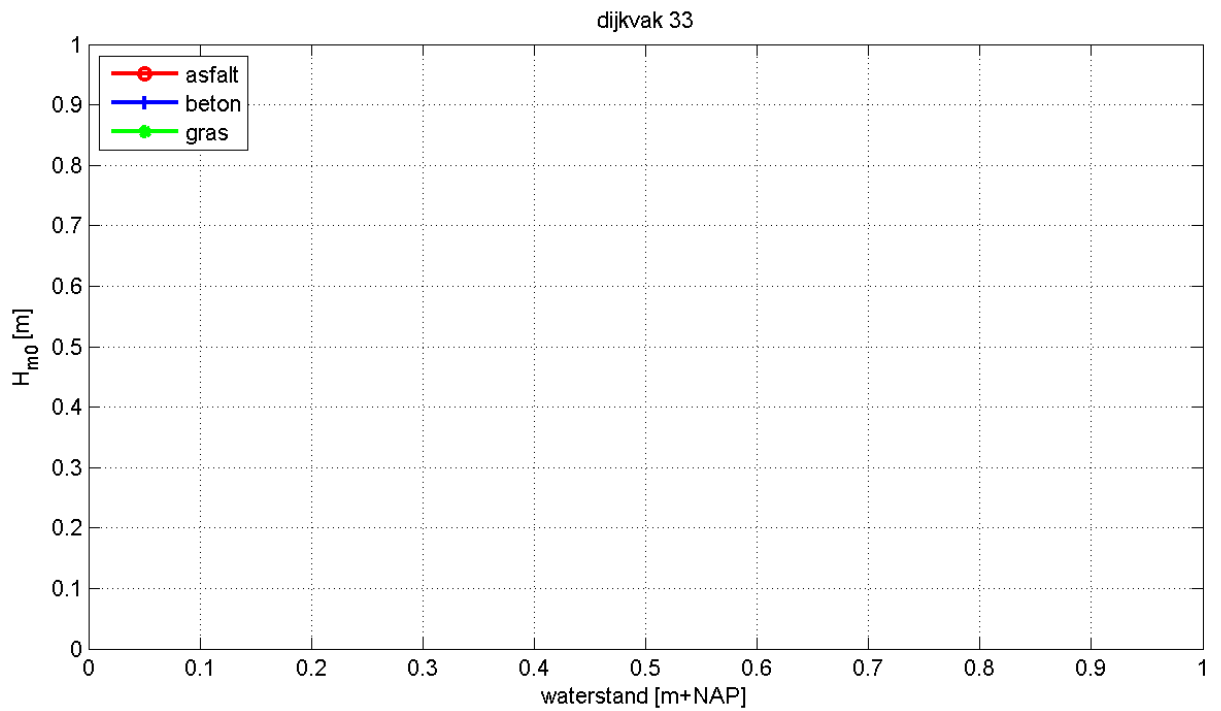
Figuur B.18: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 24



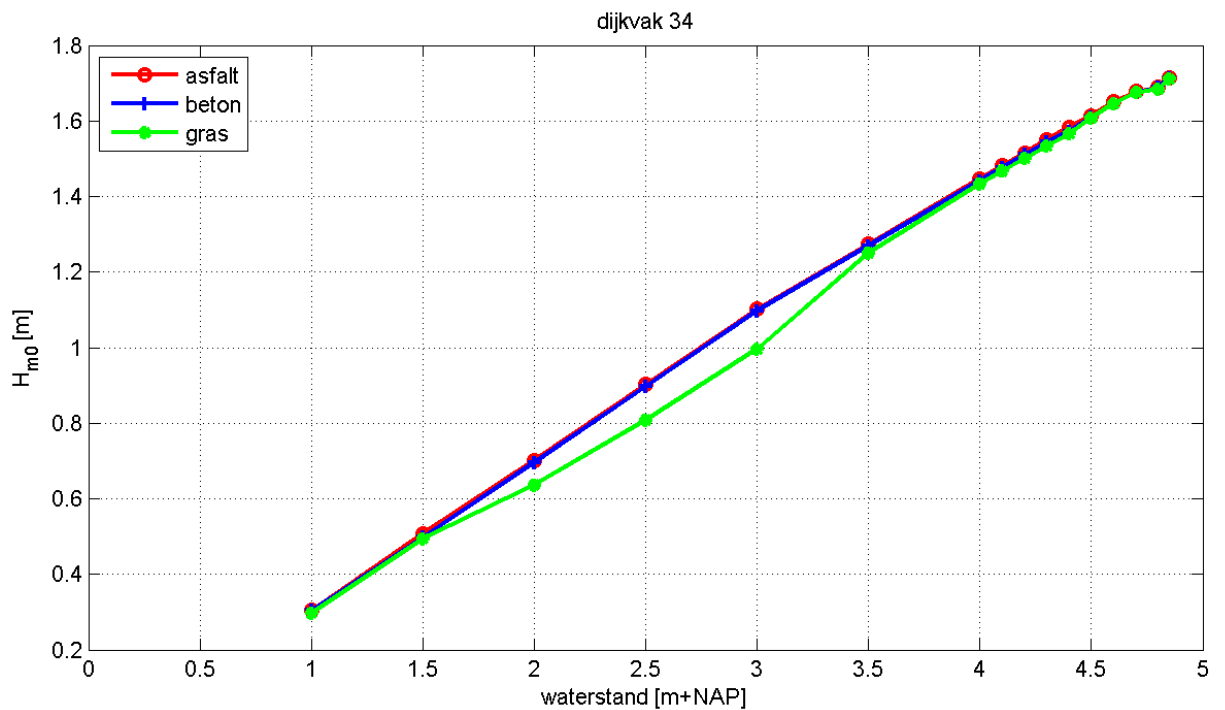
Figuur B.19: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 31



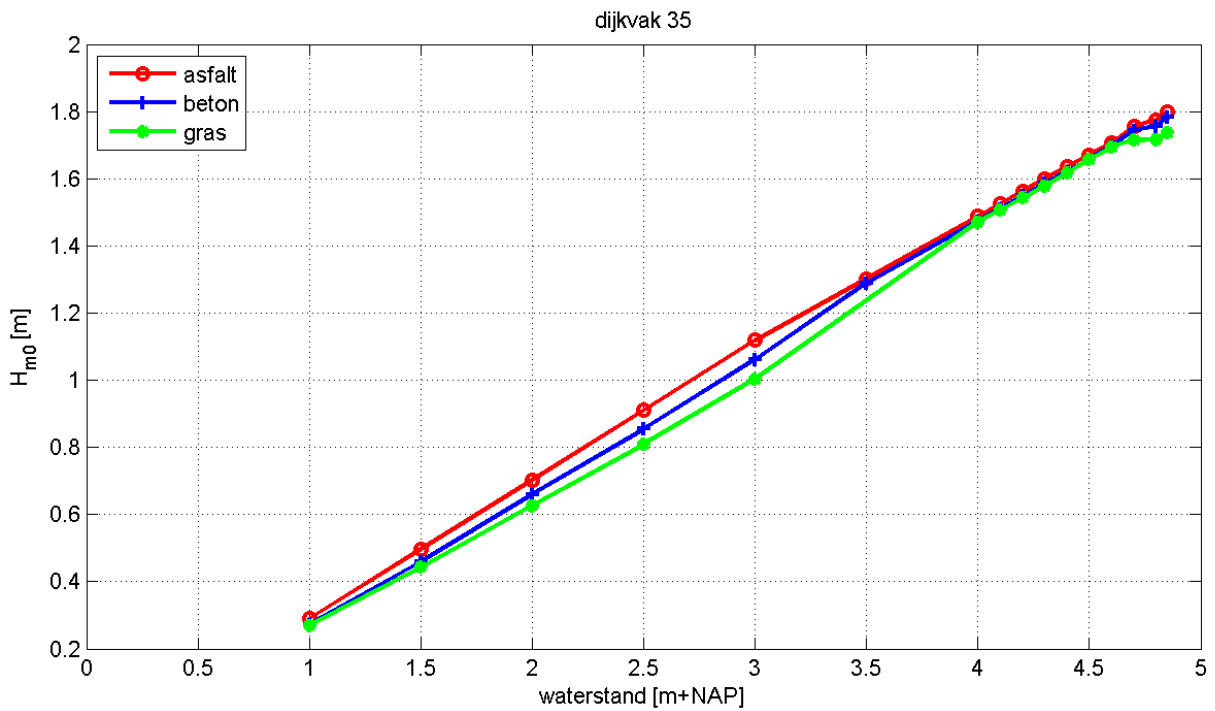
Figuur B.20: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 32



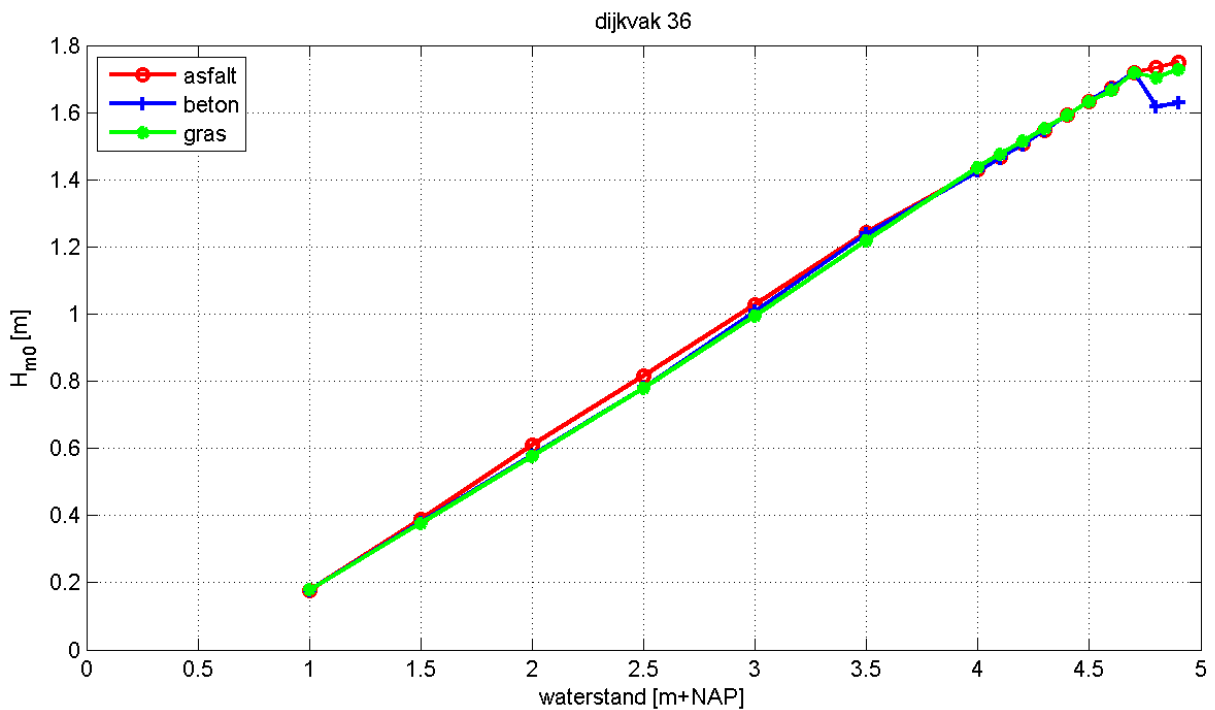
Figuur B.21: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 33



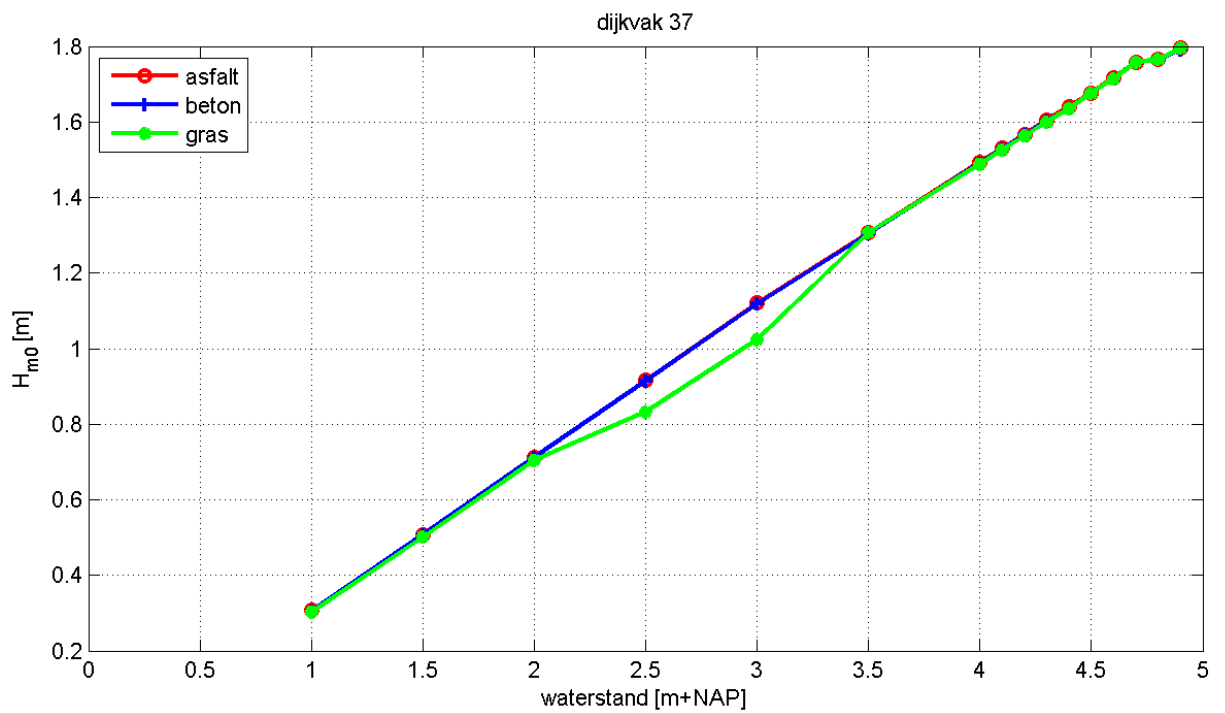
Figuur B.22: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 34



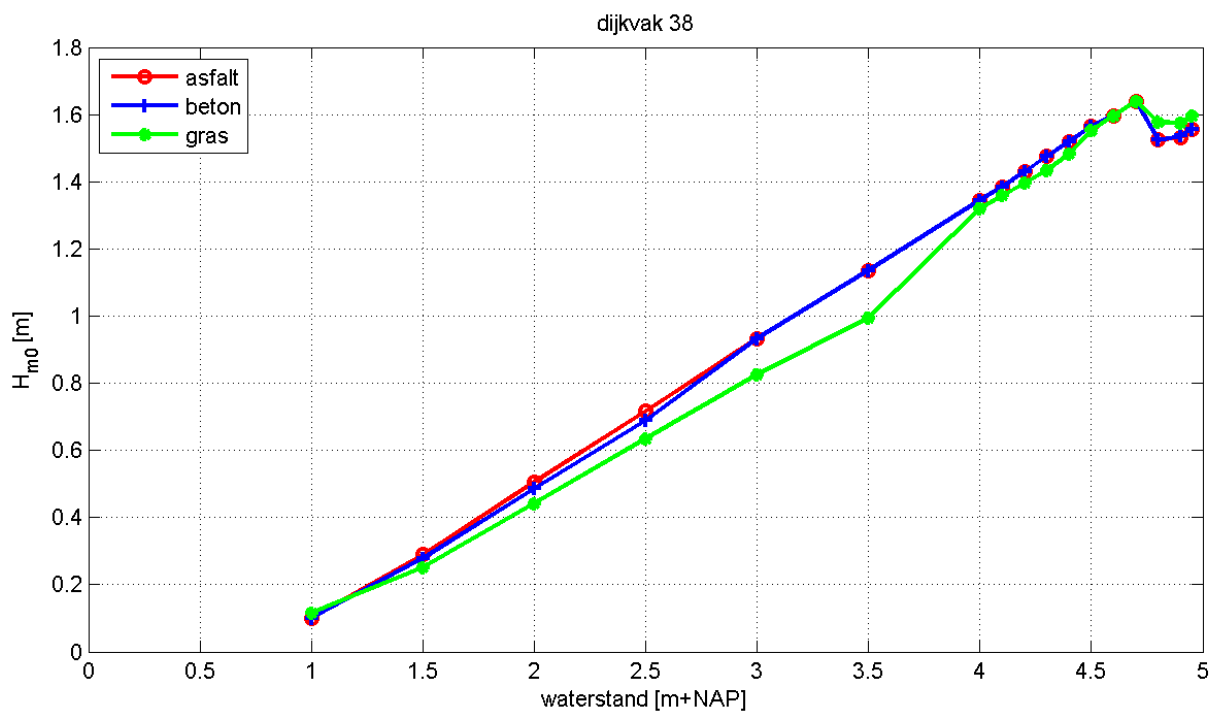
Figuur B.23: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 35



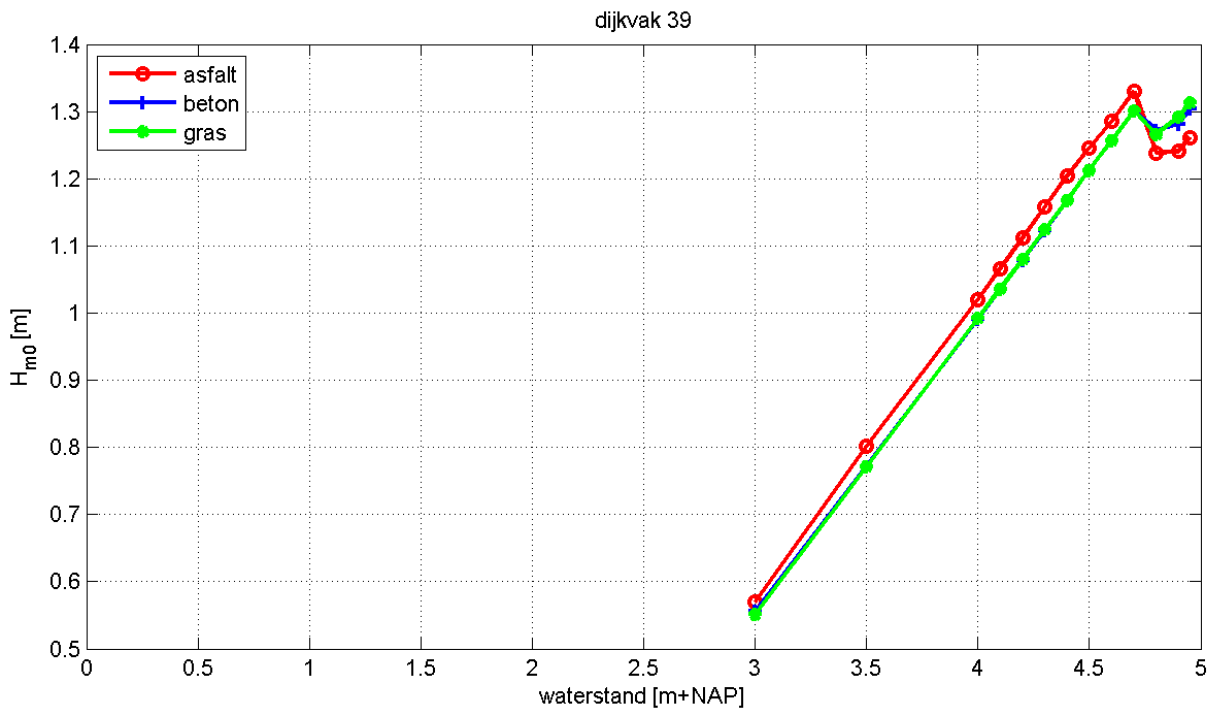
Figuur B.24: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 36



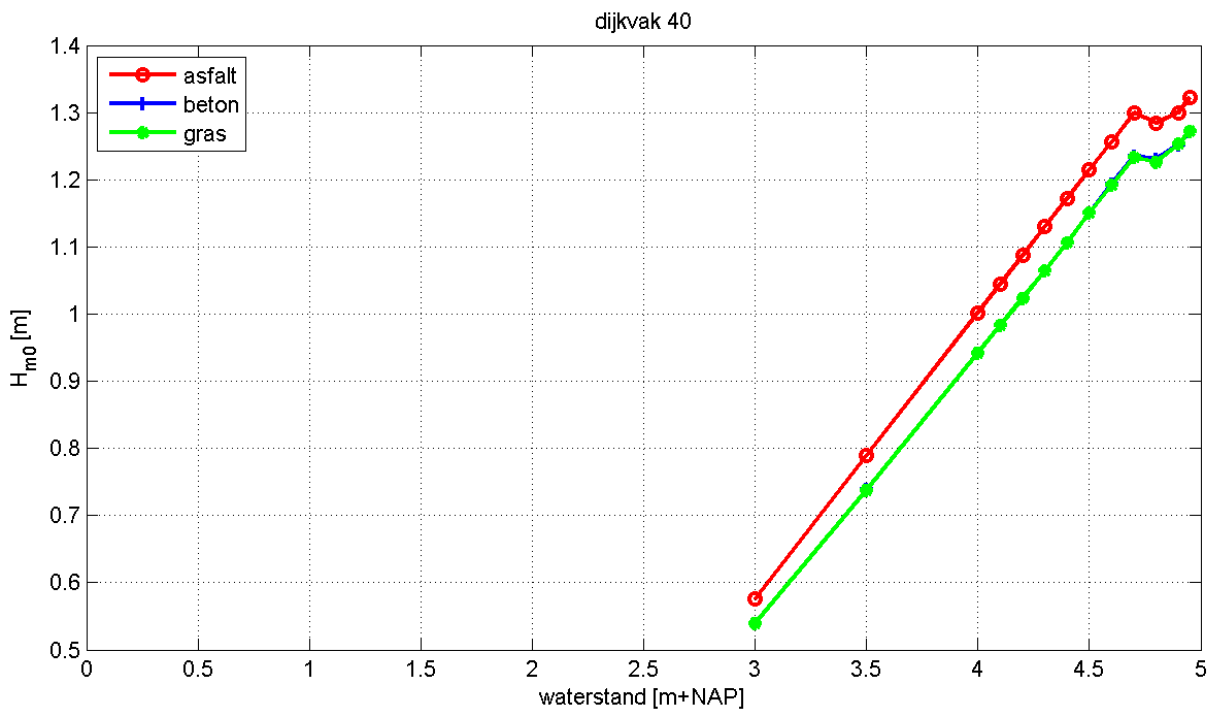
Figuur B.25: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 37



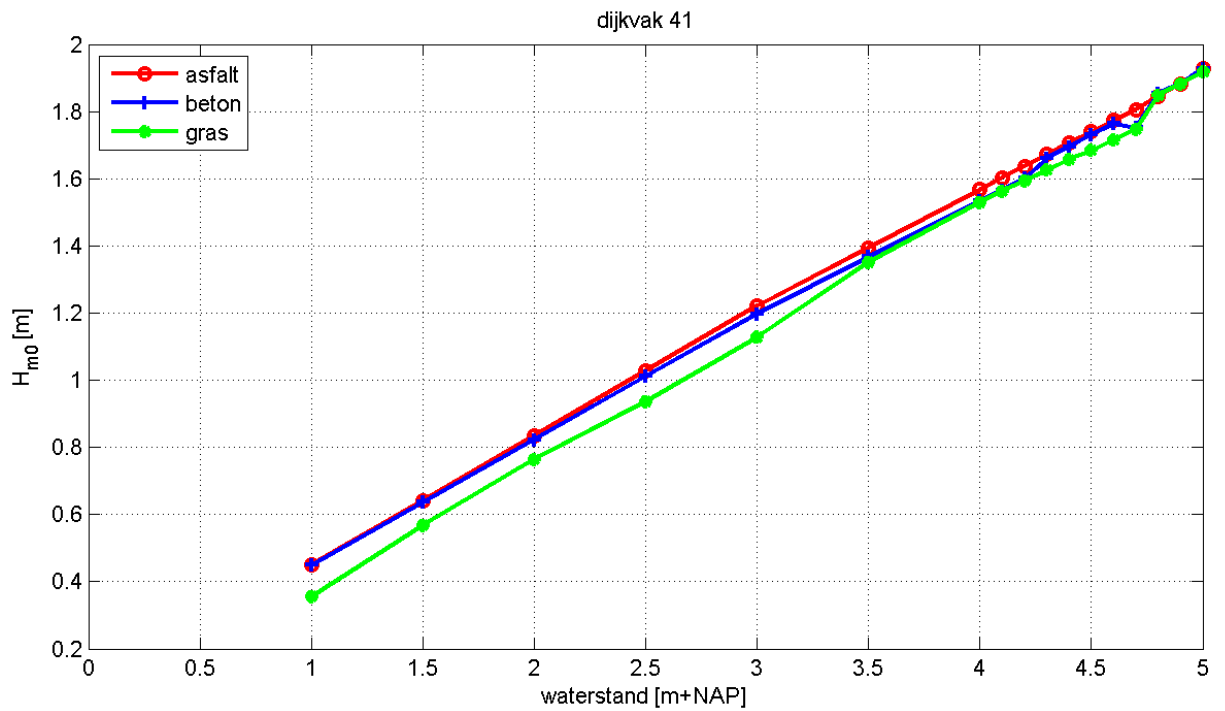
Figuur B.26: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 38



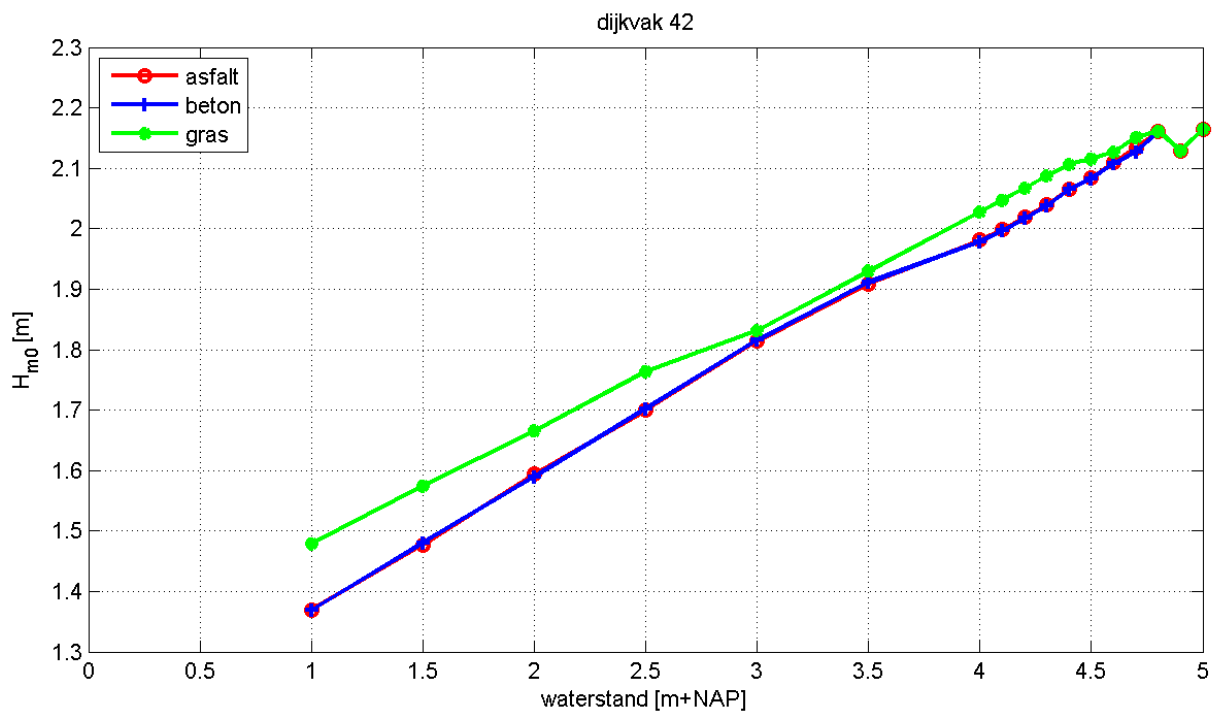
Figuur B.27: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 39



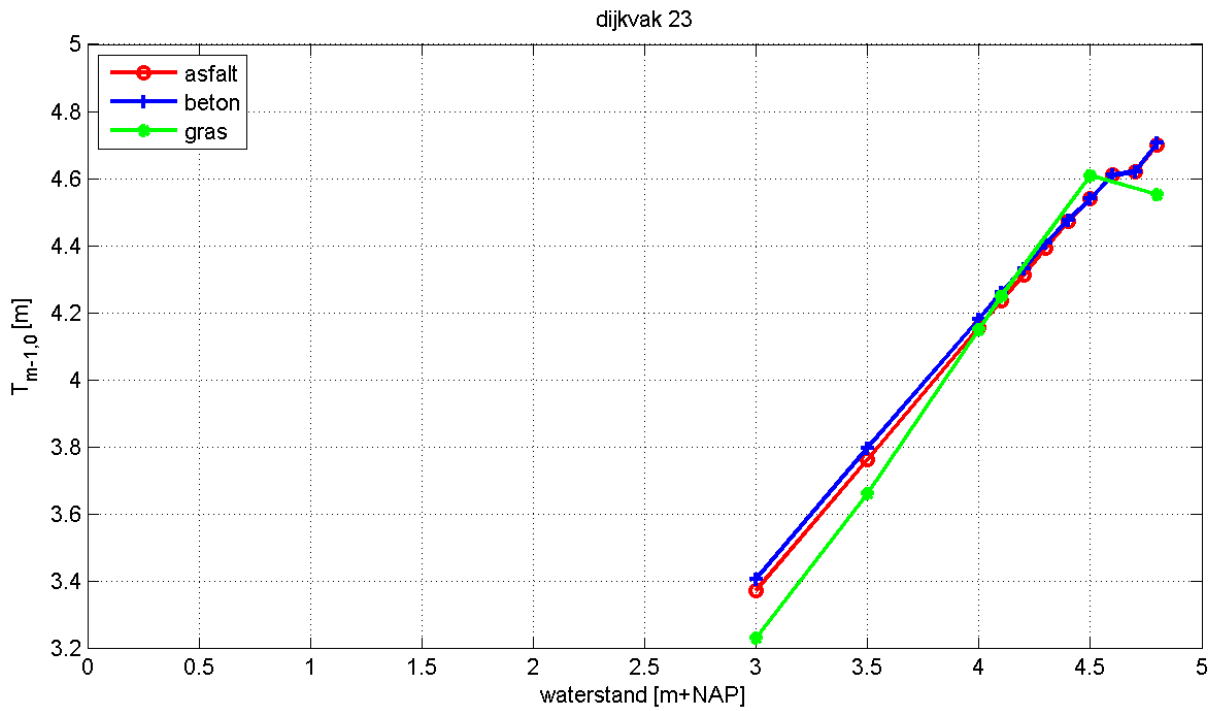
Figuur B.28: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 40



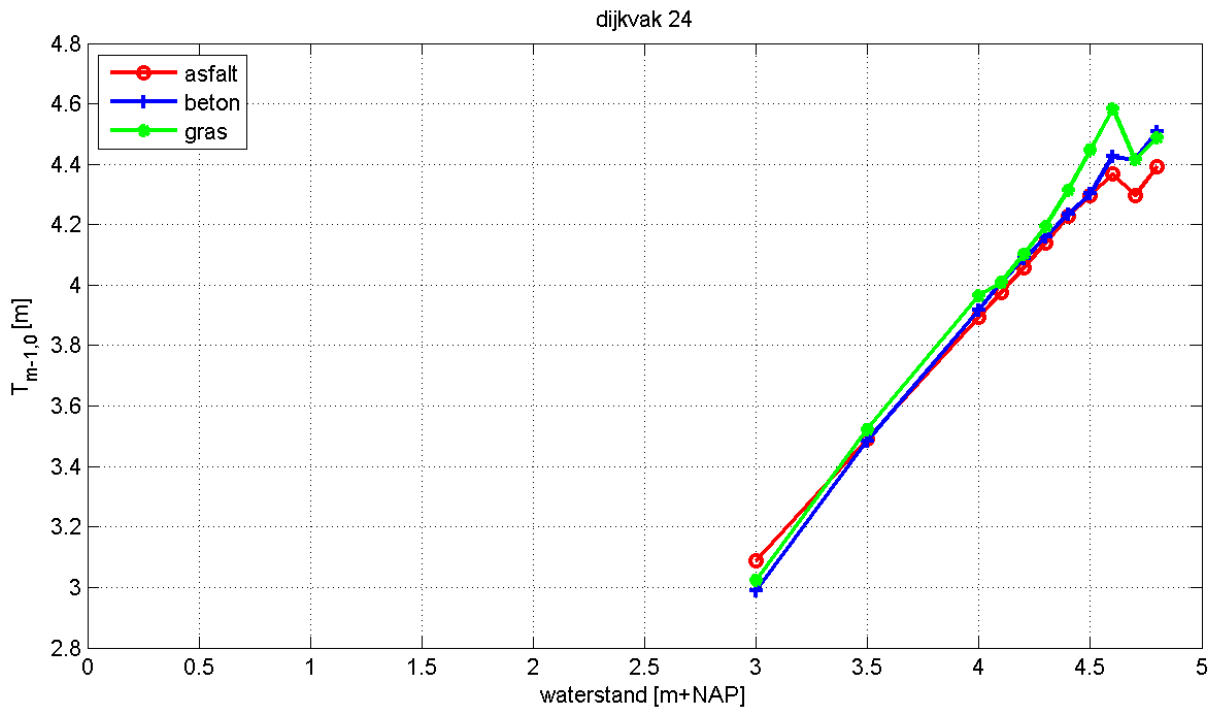
Figuur B.29: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 41



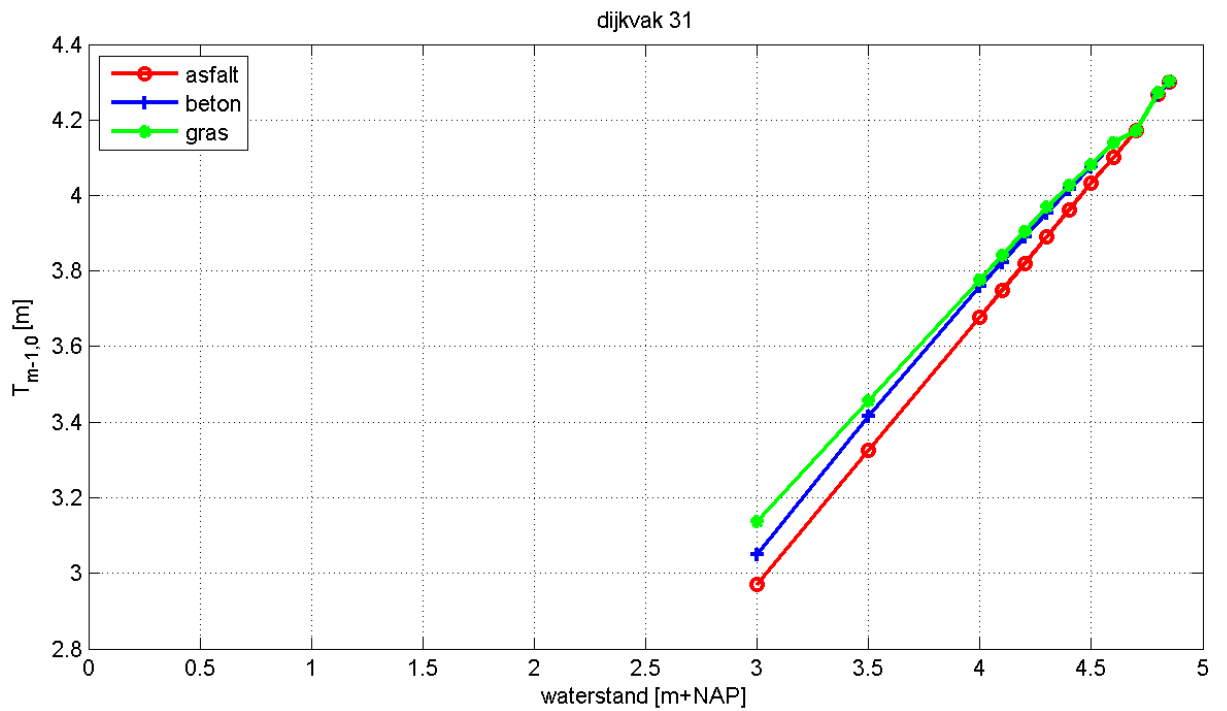
Figuur B.30: Relatie H_{m0} en waterstand voor dijkvak 42



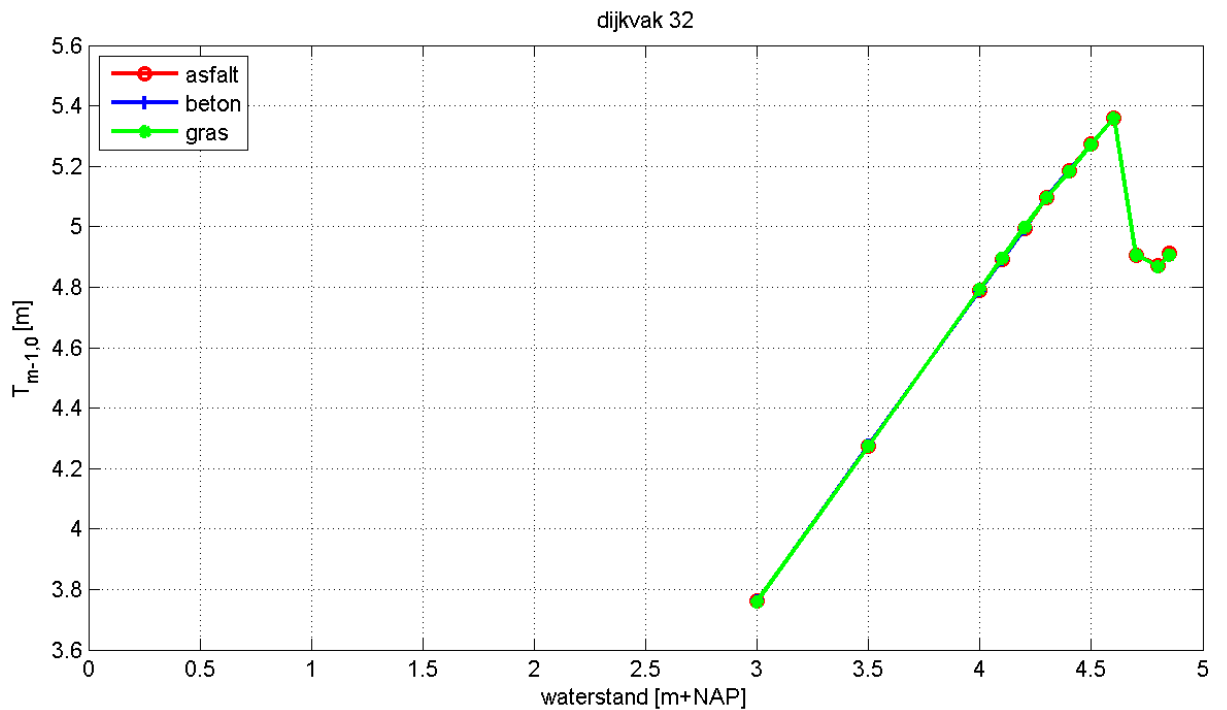
Figuur B.31: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 23



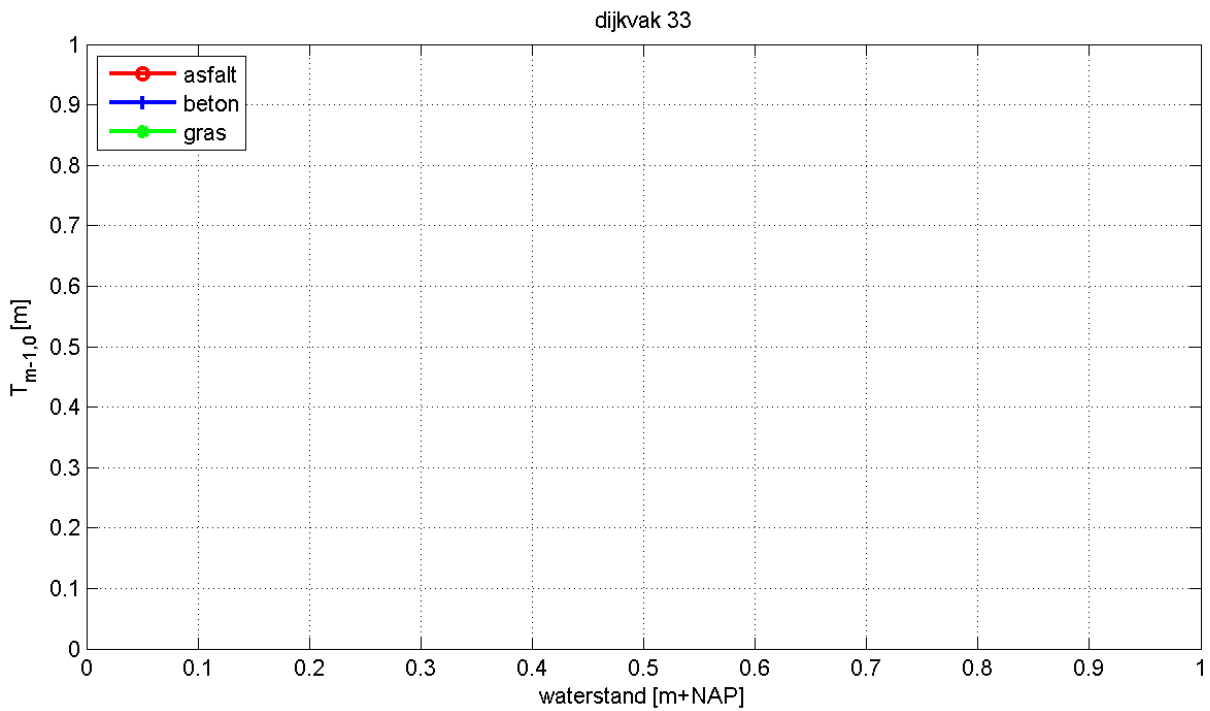
Figuur B.32: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 24



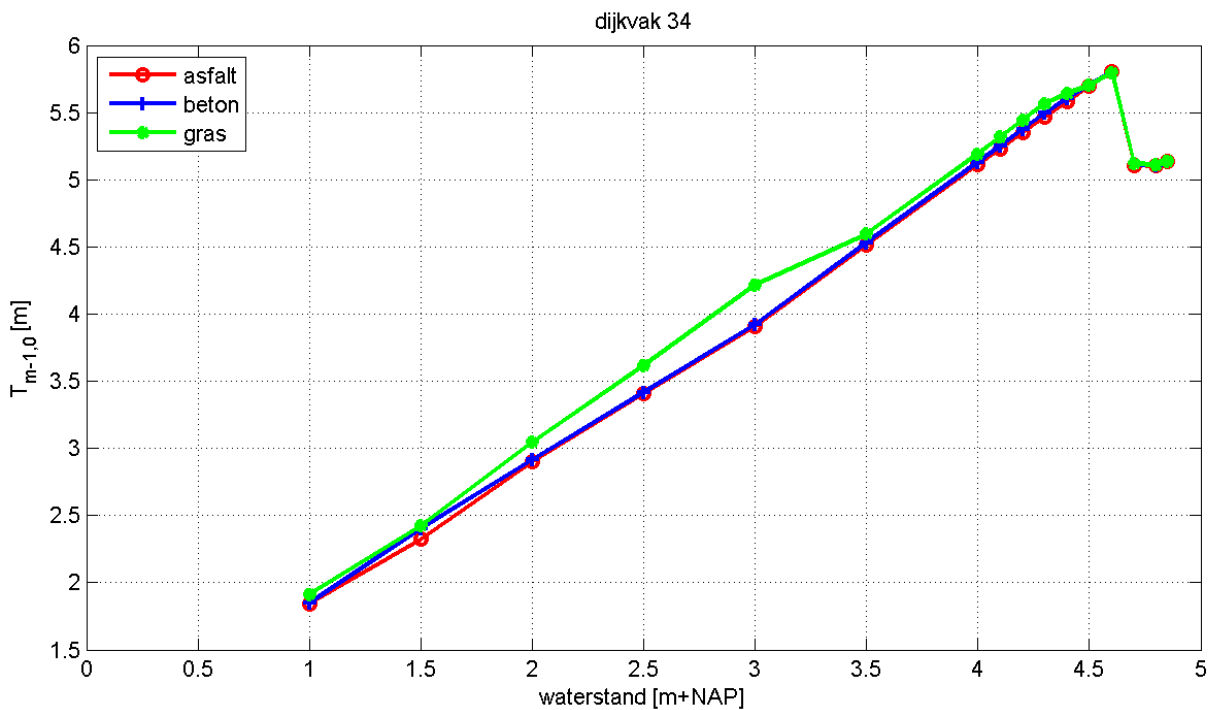
Figuur B.33: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 31



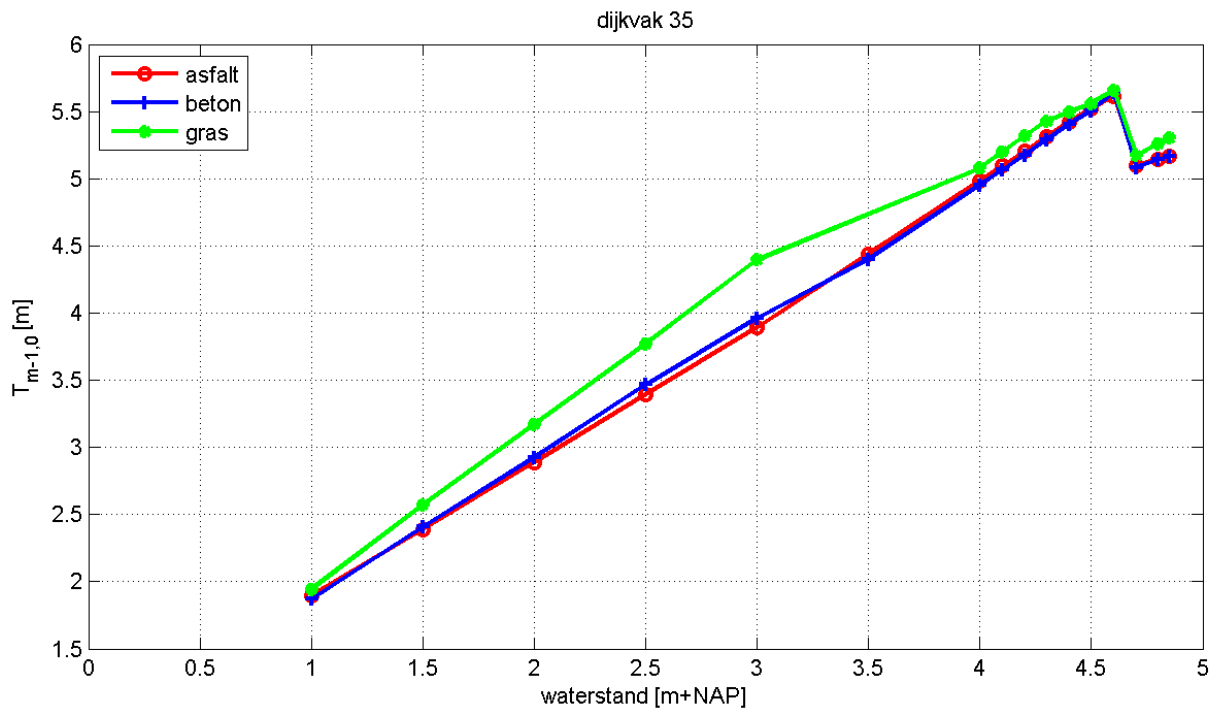
Figuur B.34: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 32



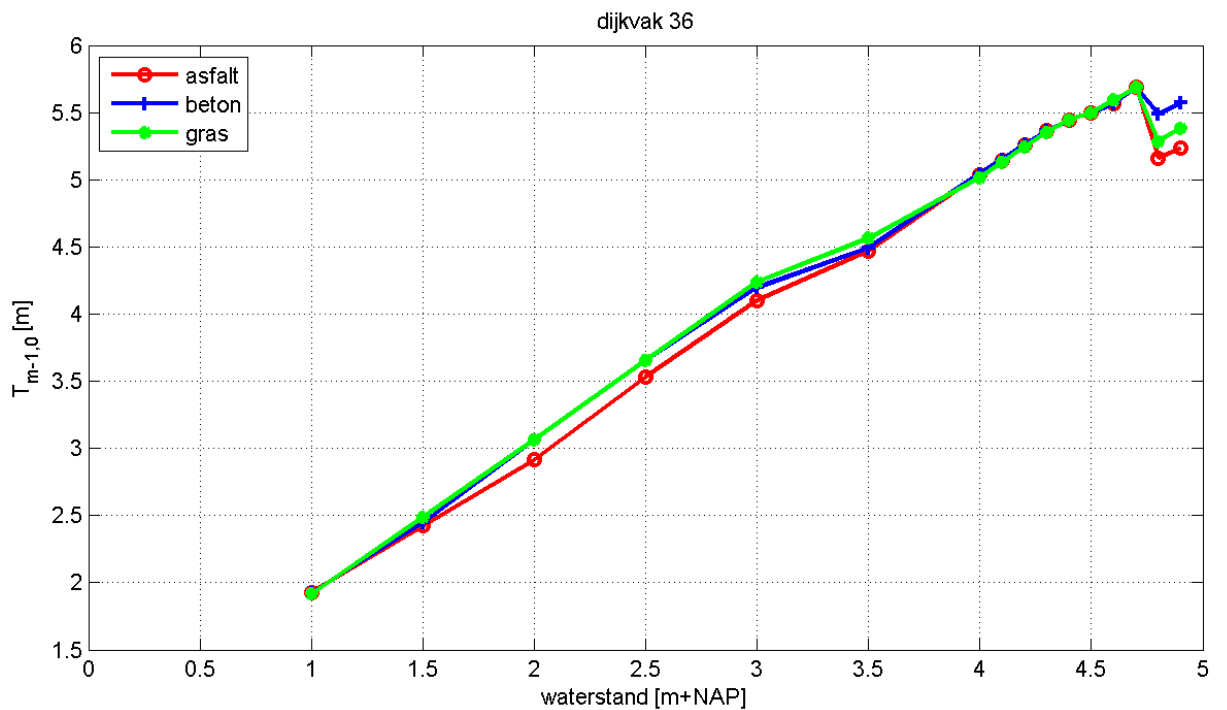
Figuur B.35: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 33



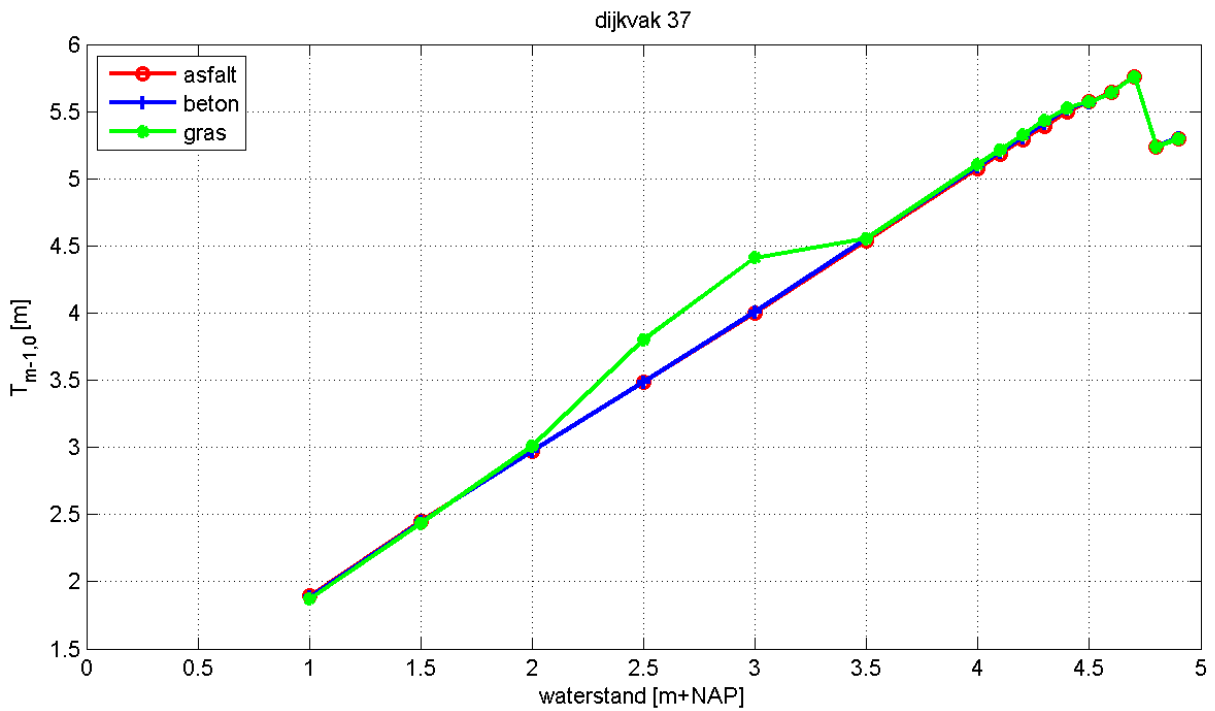
Figuur B.36: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 34



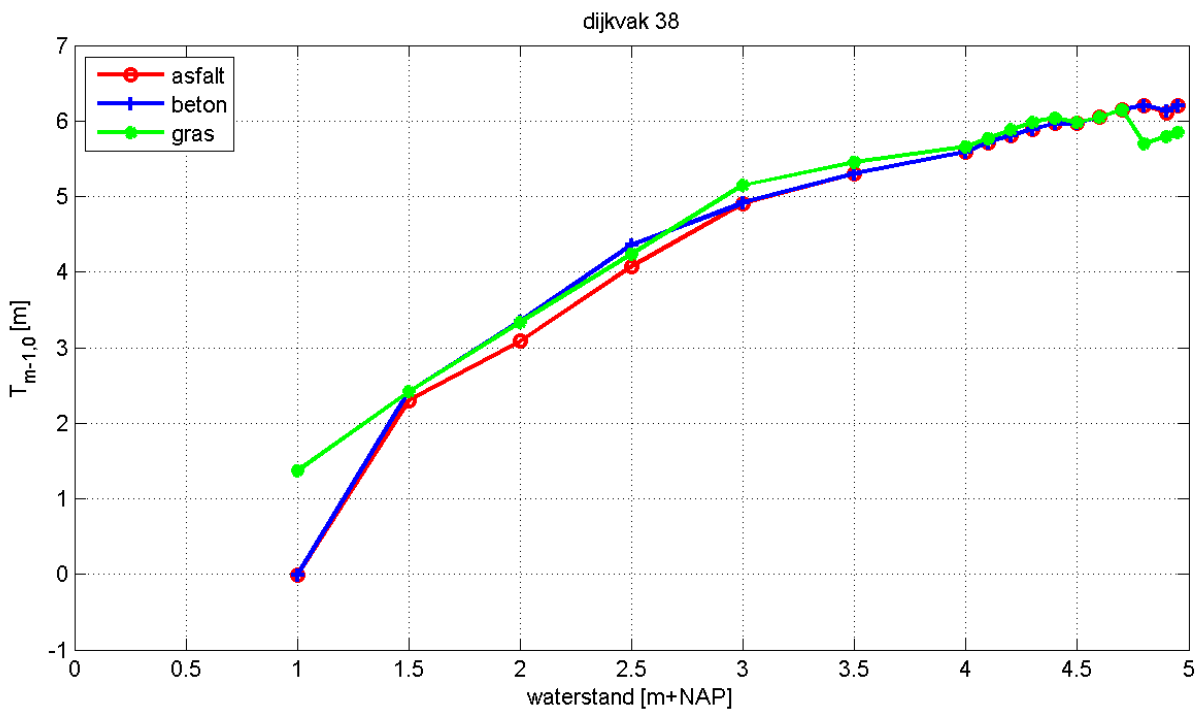
Figuur B.37: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 35



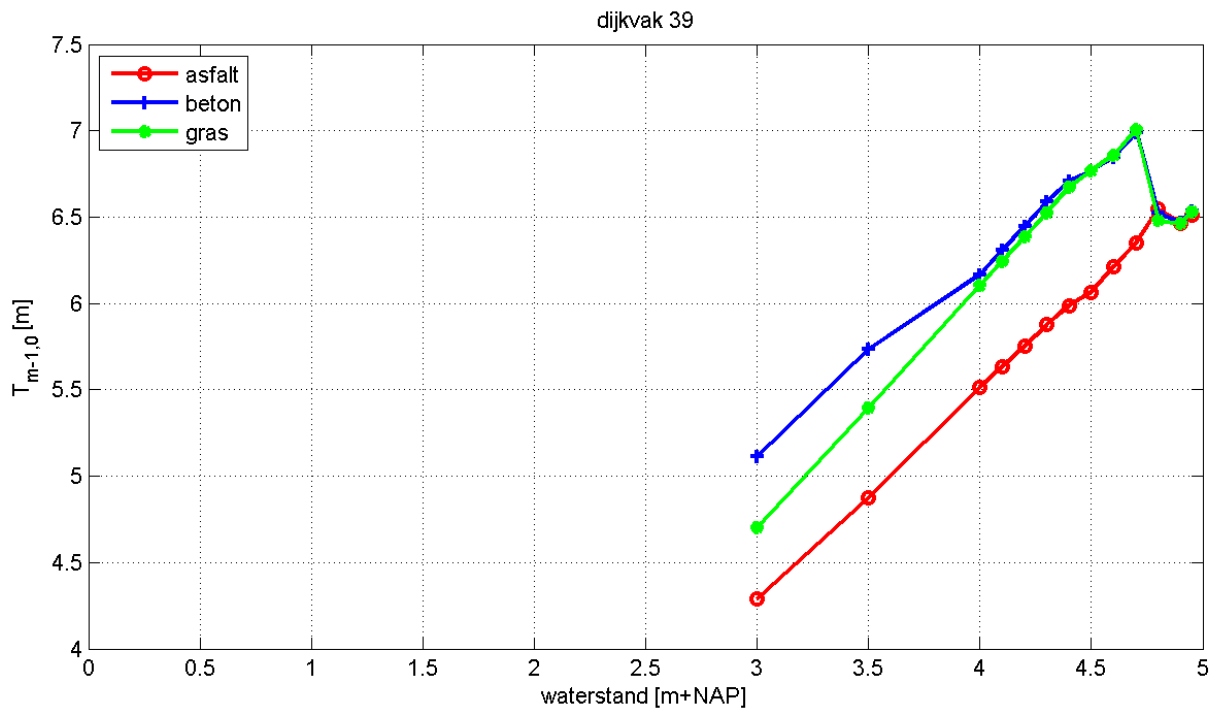
Figuur B.38: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 36



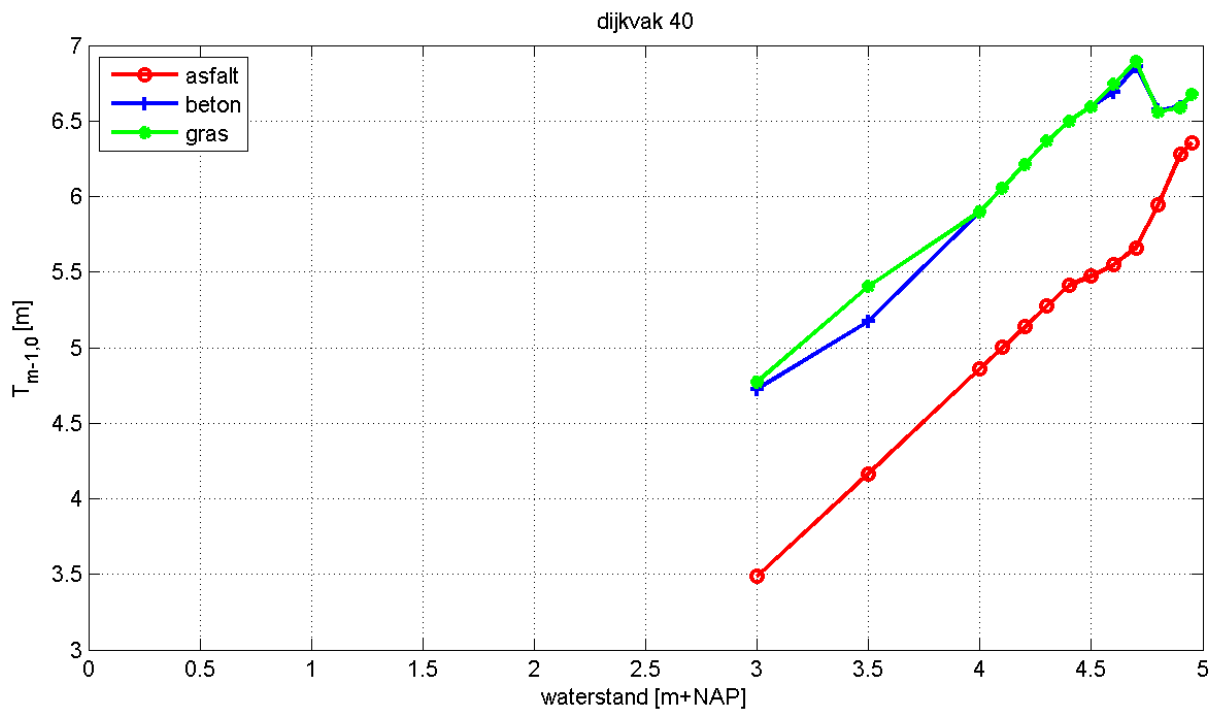
Figuur B.39: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 37



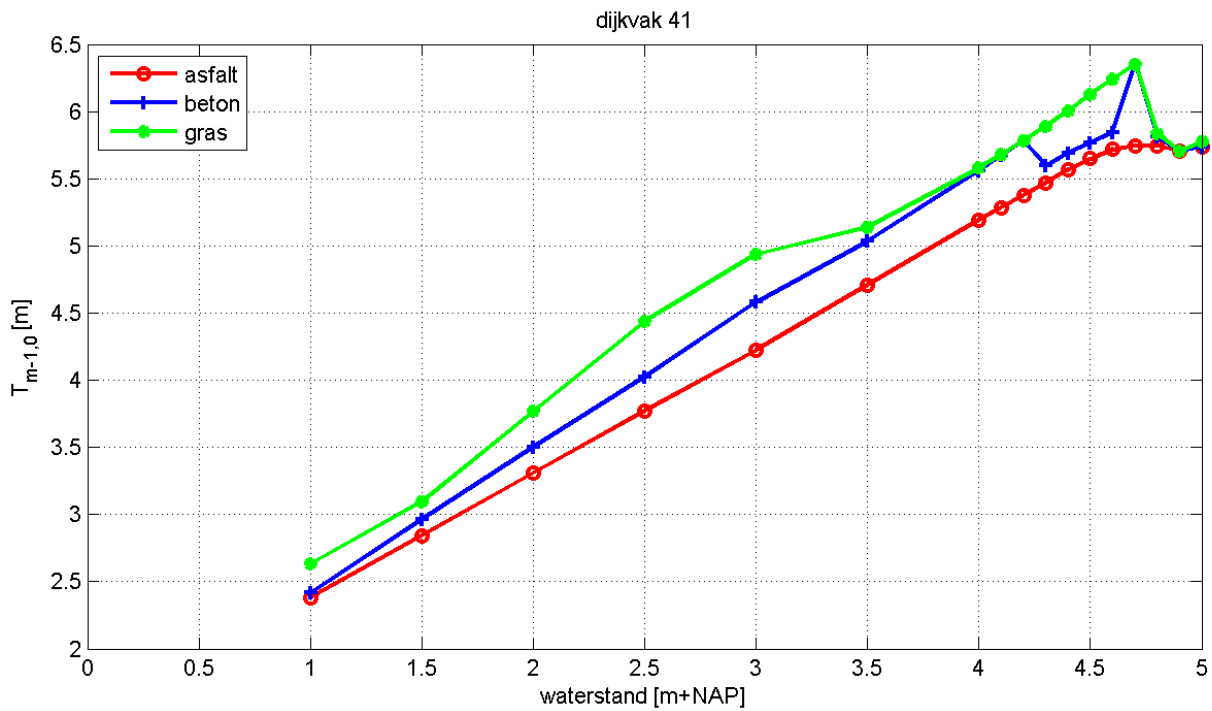
Figuur B.40: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 38



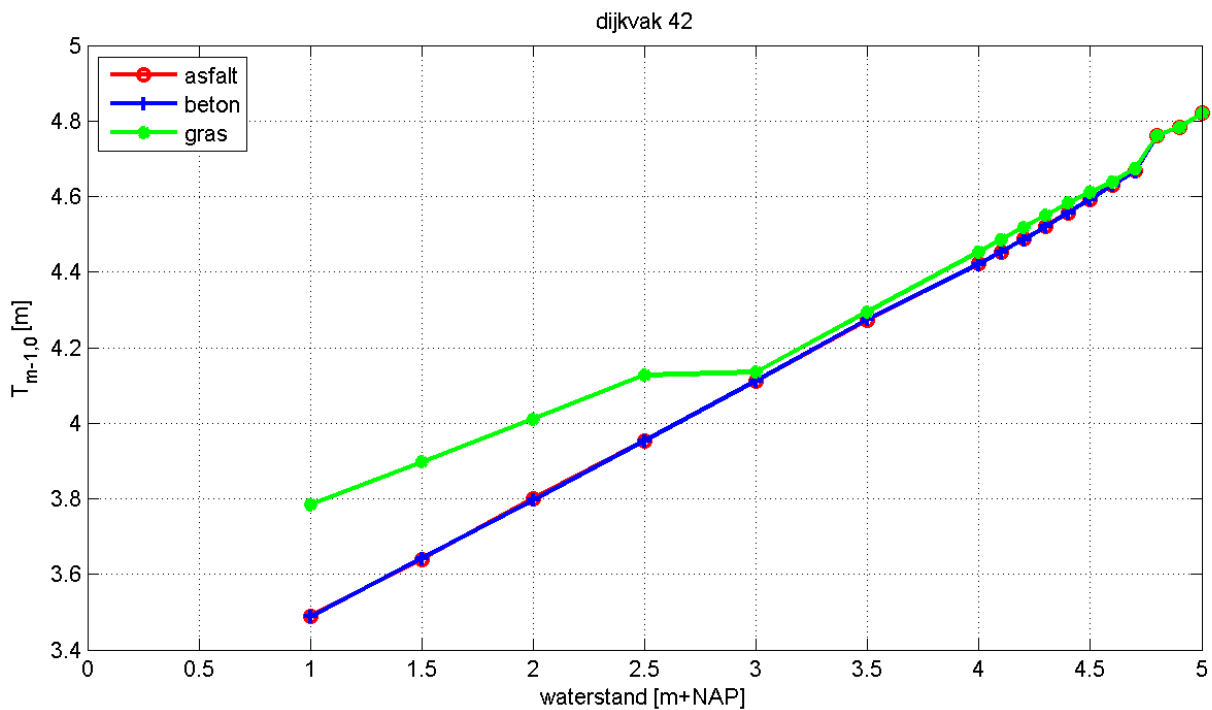
Figuur B.41: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 39



Figuur B.42: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 40



Figuur B.43: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 41



Figuur B.44: Relatie $T_{m-1,0}$ en waterstand voor dijkvak 42

C Definition of spectral measures

A number of additional spectral parameters are computed, such as extra mean period measures, peak period measures and equivalent period measures. To increase the robustness of the computation of some of these parameters for measured spectra a smoothing technique is used. This appendix contains the definitions of these parameters and the smoothing algorithm that is applied. Background information about these parameters and the smoothing algorithm are given in Alkyon (1999), Battjes and Van Vledder (1984).

C.1 Mean period measures

Firstly the mean period measures $T_{m0,1}$ and $T_{m0,2}$ are computed. These measures are based on the frequency moments m_i of a wave spectrum:

$$m_i = \int f^i E(f) df \quad (\text{C.1})$$

and read

$$T_{m0,1} = \frac{m_0}{m_1} \quad (\text{C.2})$$

$$T_{m0,2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (\text{C.3})$$

Also the following mean period measure is used:

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (\text{C.4})$$

C.2 The block peak period T_{pb}

The block peak period T_{pb} is defined as the mean period $T_{m-1,0}$ in an interval around the peak period T_p . The limits of the frequency interval are determined as the frequencies where on the lower and higher frequency (f_1 and f_2) flank around the spectral peak the energy density has a downward crossing with the level of 40% of the energy density level at the spectral peak. The equation for the computation of the block peak period is:

$$T_{pb} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f^{-1} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df} \quad (\text{C.5})$$

C.3 Equivalent period measures for double peaked spectra

In the case of a double peaked spectrum the peak periods T_{p1} and T_{p2} and the block peak periods T_{pb1} and T_{pb2} are computed for each sub-spectrum. Based on these peak period measures an equivalent peak period T_{peq} and an equivalent block peak period T_{pbeq} are computed by a weighting with the total amount of energy per sub spectrum and the fourth power of the (block) peak in each sub-spectrum:

$$T_{peq} = \sqrt[4]{T_{p1}^4 \frac{m_0^{(1)}}{m_0} + T_{p2}^4 \frac{m_0^{(2)}}{m_0}} \quad (C.6)$$

and

$$T_{pbeq} = \sqrt[4]{T_{pb1}^4 \frac{m_0^{(1)}}{m_0} + T_{pb2}^4 \frac{m_0^{(2)}}{m_0}} \quad (C.7)$$

in which m_0 is the total variances of the double peaked spectrum, and $m_0^{(1)}$ and $m_0^{(2)}$ are total wave variance in each sub-spectrum.

C.4 Peak period T_{pm}

For double peaked spectra, both the block peak period T_{pb} (based on the highest peak) and the equivalent block peak period T_{pbeq} are computed. Based on these two estimates the characteristic peak period T_{pm} is computed as:

$$T_{pm} = \max(T_{pb}, T_{pbeq}) \quad (C.8)$$